



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

**Факултет по Индустриални Технологии
Катедра Теория на Механизмите и Машините**

доц. д-р инж. физ. Венцислав Митков Янчев

ТЕХНОЛОГИЯ НА ТЪНКОСЛОЙНИТЕ РЕЗОНАНСНИ УСТРОЙСТВА НА ЛЕМБОВИ МИКРОАКУСТИЧНИ ВЪЛНИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
**"ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПРИДОБИВАНЕ НА НАУЧНАТА
СТЕПЕН „ДОКТОР НА НАУКИТЕ"**

Област: 5. Технически науки
(шифър и наименование)

Професионално направление: 5.1 Машинно Инженерство

Научна специалност: Динамика, якост и надеждност на машините,
уредите, апаратите и системите

СОФИЯ, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Теория на Механизмите и Машините“ към Факултет по Индустриални Технологии на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 22.10.2025 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 04.02.2026 г. от 15.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед №: ОЖ-5.1-95 от 13.11.2025 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

Външни хабилитирани за ТУ – София:

1. чл.-кор. проф. д.т.н. инж. Венелин Стоянов ЖИВКОВ – ПН 5.1 – кат. ТММ, ФИТ, ТУ – София
2. проф. д-р инж. Юлияна Яворова ГЕОРГИЕВА – ПН 5.1 – кат. „Приложна механика“, ФММ, ХТМУ – София
3. проф. д-р инж. Иван Николов ЧАВДАРОВ – ПН 5.1, ПН 4.6 – кат. „Мехатроника, роботика и механика“, Факултет по математика и информатика, Софийски университет „Св. Климент Охридски“
4. доц. дн инж. Анастас Иванов ИВАНОВ – ПН 5.1 – кат. „Механика“, ФТСТТ, ВТУ „Тодор Каблешков“ – София

Вътрешни хабилитирани за ТУ – София:

1. чл.-кор. проф. дн инж. Георги Димитров ТОДОРОВ – ПН 5.1 – кат. ПТС, ФИТ, ТУ – София – Председател на първото заседание
2. проф. дн инж. Иван Младенов КРАЛОВ – ПН 5.1 – кат. „Механика“, ФТ, ТУ – София
3. проф. д-р инж. Марин Христов ХРИСТОВ – ПН 5.2 – кат. „Микроелектроника“, ФЕТТ, ТУ – София

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет Теория на Механизмите и Машините на ТУ-София, блок №4, кабинет № 4540.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Теория на Механизмите и Машините“ на Факултет по Индустриални Технологии.

Автор: доц. д-р инж. физ. Венцислав Янчев

Заглавие: Технология на тънкослойните резонансни устройства на Лембови микро-акустични вълни

Тираж: 30 броя,

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

СЪДЪРЖАНИЕ

Обща характеристика на дисертационния труд	3
Съдържание на дисертационния труд	8
ГЛАВА 1. Микроакустичната технология преди и след изобретяването на тънкослойния резонатор на Лембови вълни	8
1.1 Технология на радиочестотните тънкослойни резонатори на обемни микро-акустични вълни	8
1.2 Технология на радиочестотните резонатори на повърхнинни микро-акустични вълни	11
1.3 Технология на радиочестотните тънкослойни резонатори на Лембови микро-акустични вълни	13
ГЛАВА 2. Анализ на разпространението и генерирането на S0 вълни на Лемб в периодични системи	17
2.1 Анализ на разпространението на S0 вълни на Лемб под периодични електродни структури	17
2.2 Квази-статичен анализ на възбуждането на S0 вълни на Лемб под периодични електродни структури	21
2.3 Анализ на S0 Лембови резонансни структури посредством метода на крайните елементи	22
2.4 Теория на свързаните вълни за проектиране на резонансни устройства на S0 вълни на Лемб	27
ГЛАВА 3. Технология и прототипиране на резонансни структури на Лембови вълни в пиезоелектричен AlN	29
3.1 Първият прототип на тънкослоен резонатор на S0 Лембова акустична вълна	29
3.2 Тънкослойни резонатори на S0 Лембова акустична вълна с подобрени работни характеристики	31
3.3 Тънкослоен резонатор на свързани S0 - A1 акустични вълни на Лемб	37
3.4 Тънкослоен резонатор на S1 акустична вълна на Лемб с нулева групова скорост	40
ГЛАВА 4. S0 резонансни структури с приложения в честотния контрол и радиочестотни датчици	41
4.1 Честотен генератор с резонатор на S0 вълни на Лемб	41
4.2 Радиочестотен трансформатор на напрежение	44
4.3 Гравиметрични резонансни сензори	46
4.4 Резонансни сензори на външно налягане	49
ГЛАВА 5. Резонансни структури на A1 Лембови вълни в суб-микрометрични слоеве на пиезоелектричен LiNbO ₃	51
ГЛАВА 6. Кратко описание на дисертацията и приноси	56
Списък на публикациите по дисертационния труд	61
Резюме на Английски език (Summary)	63

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Тънкослойната електро-акустична технология е сравнително нова технология. Тя започва своето развитие с изобретяването на тънкослойните резонансни устройства на обемни акустични вълни в началото на 90те години на миналия век от K. Lakin (Iowa State University) и се развива активно и в момента, демонстрирайки значим индустриален потенциал. Тези микромеханични устройства намериха масово приложение в телекомуникациите като радиочестотни филтри с ниски загуби, а също така са активно разработвани като температурни и гравиметрични датчици. През последните 20 години, научните изследвания в тази специфична област се разшириха към тънкослойни устройства на повърхнинни акустични вълни и на вълни на Лемб. В резултат на тези интензивни изследвания, се увеличи драматично качеството на радиочестотните филтри, като същевременно се разшири и техният честотен обхват. Понастоящем, тънкослойните електро-акустични филтри се използват в мобилните комуникации в честотния диапазон 700MHz – 7GHz, като в различните честотни диапазони доминират тънкослойни прибори на специфични микроакустични вълни. Така например, при честоти под 3 GHz доминират тънкослойните прибори на повърхнинни акустични вълни, докато в честотния диапазон над 5GHz доминират тънкослойните прибори на Лембови вълни. Авторът на тази дисертация има съществени приноси и в трите направления на тънкослойната технология. В тази дисертация са описани само приносите в тънкослойната резонансна технология на Лембови акустични вълни. Ниската себестойност и технологичната съвместимост с интегралните схеми прави от тази технология обещаващ кандидат за приложения в интегрални микровълнови прибори от следващо поколение. Понастоящем, тънкослойната технология на базата на Лембови вълни се използва широко във филтри и мултиплексори в честотния диапазон 5 GHz – 7 GHz. В допълнение, пазара на тънкослойната резонансна технологията се разшири към силно чувствителни, интегрируеми гравиметрични и температурни датчици, както и датчици на налягане. Множество съвременни изследвания обхващат специфичните предимства на тънкослойната технология на Лембови микроакустични вълни при проектирането на такива датчици. Тук са изследвани всички аспекти на тънкослойната резонансна технология на Лембови микроакустични вълни. Специфично е разгледана технологията на прототипиране на тънкослойни Лембови резонатори върху пиезоелектрични мембрани от алуминиев нитрид (AlN) и литиев ниобат (LiNbO₃), разработени са ефективни модели подпомагащи проектирането, оптимизацията и прототипирането на микро-

акустичните прибори на Лембови вълни. Актуалното състояние на технологията е изложено заедно със специфичните научни приноси и най новите аспекти на продължаващите научни изследвания.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Дисертационния труд разглежда разработването на тънкослойната резонансна технология на Лембови вълни от самото и начало, като систематично изследва теоретичните, технологичните и приложните аспекти на технологията започвайки от физичните фундаменти. В този смисъл дисертацията претендира да бъде част от изобретяването и основополагането на това направление на микро-акустичната технология с публикуването на първата реферирана научна работа по темата в началото на 2005 в *Applied Physics Letters*. Целта се дефинира като изследване на технологията в нейните теоретични, технологични и приложни аспекти. Задачите на дисертационния труд могат да бъдат формулирани както следва:

- Разработване на аналитични вълнови модели за ефективен анализ на резонансни структури на Лембови акустични вълни;
- Проектиране на Лембови резонатори с висок качествен фактор
- Адаптиране на МЕМС технологията към прототипирането на микро-акустични резонатори на Лембови вълни.
- Прототипиране и характеризиране на Лембови резонатори с подобрени характеристики и температурна компенсация
- Изобретяване на нови резонансни системи на базата на Лембови акустични вълни.
- Изследване на Лембовите микроакустични резонатори в честотни генератори с нисък шум.
- Изследване на Лембовите микроакустични резонатори като гравиметрични датчици и датчици на налягане.
- Изобретяване на радио-честотни трансформатори на напрежение на базата на Лембовите микроакустични резонатори и приложението им в комуникационни системи с ниска мощност
- Изобретяване на тънкослойни резонансни структури на вълни на Лемб с широка честотна лента между резонанс и антирезонанс
- Проектиране, прототипиране и характеризиране на широко-лентови комуникационни филтри при честоти над 4 GHz

Научна новост

Темата е нова по своя генезис. С изпращането за публикуване на първите експериментални резултати през 2004 се постави началото на научно поле което е активно и до днес и вече дава своите първи индустриални резултати. Първоначално, темата беше активно разработвана в съперничество с престижни университети от САЩ, а през последните 10 – 15 години се включиха активно научни групи от Япония, Китай и Сингапур. Повечето от колегите работили по темата са отдавна промотирани като професори в престижни университети от топ 100. Работата по тънкослойната Лембова технология се ограничава в научни организации с чисти стаи с възможности за прототипиране на микроелектронни и MEMS компоненти. Изискването към финансирането на този тип научни изследвания е такова, че ограничава включването на твърде широк кръг от научни колективи. Поради същите причини, технологията се развива индустриално само във високо-технологични държави като САЩ, Япония и Китай.

Работата включва няколко нови аспекта на изследванията, които са развивани синергично във времето с оглед постигането на поставените цели. Аспектите са както следва:

- Разработването на теоретичните модели представлява адаптиране на модели известни в анализа на повърхнинни акустични вълни към анализа на Лембови вълни. За пръв път са анализирани Лембови резонатори с теория на свързаните вълни. Разработени са нови методи за ефективен анализ на микроакустични структури на базата на метода на крайните елементи.
- За пръв път е разработена технология за прототипиране на резонансни тънкослойни структури от Лембов тип. По същество, технологията е адаптиран вариант на индустриалната технология на тънкослойните обемни акустични вълни, като са въведени допълнителни технологични операции специфични за Лембовите структури. Технологията в последствие е адаптирана към пиезоелектрични слоеве получени чрез трансфер от обемн монокристален образец.
- Наред с изобретяването на Лембовия резонатор на S_0 вълна на Лемб, са изобретени Лембови резонатори с вътрешно-вълново резонансно взаимодействие между A_1 и S_0 вълни на Лемб. Изобретени са резонатори с нулева групова скорост на базата на S_1 Лембови вълни. Изобретени са резонатори на A_1 Лембови вълни с висок фактор на електромеханична връзка и възможност за работа при относително високи честоти и повишени мощности. Изобретени са резонансни структури с периодични пиедестали от Bragg тип.

- Идентифицирани са нови приложения в областта на честотния контрол и сензорите с висока резолюция.

Практическа приложимост

Тънкослойната резонансна технология на Лембови микро-акустични вълни представлява съществен дял от микроакустичната технология. Изследванията включени в дисертацията са били винаги водещи в полето за времето когато са били публикувани. В този смисъл, изследванията са извършвани без да се предполага, че структурите ще са приложими в близко бъдеще. В процеса на разработване на темата се установиха няколко перспективни направления в които резонансните прибори от Лембов тип имат известни преимущества на технологията. В частност, възможността за постигане на ниски шумове в генератори стабилизирани чрез тънкослойни Лембови резонатори в комбинация с високата чувствителност на тези резонатори към гравиметрични и деформационни влияния предполага използването им в датчици с висока резолюция. Радиочестотните трансформатори на напрежение на базата S0 тип вълни отварят изцяло нов тип приложения в комуникации при ниски енергийни консумации. Лембовите вълни от S1 тип в AlN мембрани и от A1 тип в LiNbO₃ мембрани имат специфични качества за приложение в телекомуникационните филтри. През м. Май 2025, Murata Manufacturing (Japan) обяви първия си широко-лентов Wi-Fi филтър на базата на A1 Лембовите вълни. Полето е все още в развитие, като се очаква индустриалните приложения в бъдеще да се увеличават.

Апробация

Резултатите от дисертацията са:

- публикувани в 21 реферирани и индексирани списания с импакт фактор;
- докладвани и публикувани в 8 реферирани и индексирани конференции на IEEE в чужбина;
- докладвани и публикувани в 1 конференция с научно рецензиране на GOMACTech (microcircuit applications for government systems) в САЩ;
- публикувани в 8 признати US патента в САЩ;

Цитиране: Към Октомври 2025 в SCOPUS са забелязани над 800 цитирания (изключвайки автоцитиранията) на авторски публикации, включени в дисертацията, в поле на научни и приложни изследвания със среден импакт фактор 2.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в престижни научни списания като Applied Physics Letters (AIP), Journal of Applied Physics (AIP), Transactions in UFFC (IEEE), Journal of Microelectromechanical Systems (IEEE), Journal of Micromechanics and Microengineering (IOP), Sensors and Actuators B (Elsevier), Solid-State Electronics (Elsevier), Ultrasonics (Elsevier), Electronics Letters (IET). Част от резултатите са докладвани в обзорец поканен доклад на 2012 IEEE Int. Ultrasonic. Symposium (Invited Talk).

Диверсифицирането на публикациите към широк кръг от издания е направено с оглед постигането на максимална публичност на получените резултати.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е с обем 281 страници и се състои от, увод, 4 глави, приноси, списък на включените публикации (общо 38), списък на използвана литература, включваща 198 източника, и заключение. Работата включва общо 204 фигури, 21 таблици и 54 формули. Номерата на фигурите, формулите, таблиците и цитатите в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. МИКРОАКУСТИЧНАТА ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕДИ И СЛЕД ИЗОБРЕТЯВАНЕТО НА ТЪНКОСЛОЙНИЯ РЕЗОНАТОР НА ЛЕМБОВИ ВЪЛНИ

Изследванията върху тънкослойната резонансна технология на Лембови акустични вълни започнаха през 2003 година, с първи експериментални резултати изпратени за публикуване през 2004 и публикувани в началото на 2005 [1]. В последващите 10 години тази тема беше обект на изключително интензивни научни изследвания, които продължават и до днес. Възникването на това научно поле беше стимулирано от необходимостта за увеличаване на работните честоти на микроакустичните резонатори чрез използването на конвенционални фото-литографски системи с индустриална значимост. Два основни типа микро-акустични технологии доминираха в тези години. Технологията на повърхнинните акустични вълни беше представена от приповърхнинните вълни (LSAW) и от температурно компенсирани повърхнинни вълни от Rayleigh тип (TC-SAW), които се характеризират с ниска себестойност и относително лесно производство за сметка на ограничените им качествени характеристики. Тези типове устройства бяха с ограничени качествени фактори (Q) и работни честоти далеч под 3 GHz. Другата технология която доминираше пазара беше тънкослойната резонансна технология на обемни акустични вълни (BAW), която имаше значителни предимства в честотния диапазон над 2 GHz, свързани със значително подобрение на качествения фактор и дефиниране на работната честота което не изисква сложни фото литографски процеси. Следва обзор върху еволюцията на тези ключови технологии, който включва времето преди и след изобретяването на тънкослойната резонансна технология на Лембови акустични вълни. Този обзор има за цел да покаже контекста в който възникват изследванията в дисертацията върху тънкослойната резонансна технология на Лембови акустични вълни. Също така е проследена еволюцията на тези технологии до днес.

1.1 Технология на радиочестотните тънкослойни резонатори на обемни микро-акустични вълни

Технологията на радиочестотните тънкослойни резонатори на обемни микро-акустични възниква с изобретяването на тънкослойния обемен акустичен резонатор преди повече от 30 години от Kenneth Lakin [3] от Iowa State University, САЩ. Тези тънкослойни резонатори използват пиезоелектрични с-ориентиран тънък слой AlN нанесен върху силициева подложка (Si). Тази концепция беше детайлно разработена и доведена до индустриална зрялост от Rich Ruby [4], като

част от HP Labs, Palo Alto, САЩ. Той въведе и първия продукт на тази технология с приложение в комуникационните модули на мобилните телефони през 2000г. – 2001г.. Последващото десетилетие в микро-акустиката, беше десетилетието на тънкослойната резонансна технология на обемни акустични вълни, които демонстрираха работни характеристики с безпрецедентни качествени показатели. Това първо технологично поколение демонстрира качествени фактори Q от 5000 при 2 GHz работна честота, като същевременно температурната чувствителност и максималната мощност на приборите бяха значително по-добри от достигнатите от конвенционалната технология на повърхнинни акустични вълни. За разлика от повърхнинните акустични вълни, резонансната честота 'F' на обемните акустични резонатори се определя приблизително от дебелината на устройството 'd' както $F=V/(2d)$, където V е скоростта на акустичната вълна. Този аспект на технологията, предопределя критичното значение на контрола на дебелината на тънките слоеве както и тяхната равномерност на дебелината по цялата площ на силициевата пластина, с оглед постигането на висок рандеман в производството. Това само по себе си изисква множество допълнителни метрологични и компенсиращи процедури, което прави производството на тези компоненти по скъпо в сравнение с техните аналози на повърхнинни акустични вълни. По тази причина, значими изследвания бяха направени по отношение подобряването на работните характеристики на приборите на повърхнинни акустични вълни, което оформи едно агресивно технологично съревнование, което продължава и до днес. Преди около 15 години, Sc легирания AlN слой беше изобретен от M. Akiyama [5], който навлезе широко в тънкослойната резонансна технология на обемни акустични вълни. Демонстрира се значително подобряване на пиезоелектричността като функция на концентрацията на Sc в слоя AlN. Практически, това позволи значителното увеличаване на честотната лента между резонанс и антирезонанс на резонаторите, като същевременно ограниченото увеличение на диелектричната проницаемост позволи известно намаляване на размерите на радиочестотните филтри. Първите многообещаващи резултати бяха публикувани веднага след откритието на новия пиезоелектричен материал [6, 7] като интензивните изследвания продължават и днес. В резултат, второто поколение тънкослойни резонатори на обемни акустични вълни е базирано основно Sc легирани AlN тънки слоеве със Sc концентрации от около 10% и по-големи. Понастоящем, AlScN тънки слоеве със Sc концентрации надхвърлящи 30% са необходими за проектирането на широколентови телекомуникационни филтри под 7 GHz. Напоследък се демонстрират, резонатори с коефициент на електромеханична връзка над 20% и качествени фактори Q над 1000 при честота от 6 GHz [8]. Проектирането и производството на

резонатори в този честотен диапазон е предизвикателство, особено когато се търси висок рандеман в масовото производство, където са необходими както функционална така и дебелинна равномерност на слоя по цялата площ на 6" и 8" силициеви пластини. Необходима е също така повторяемост на резултатите от процесите на нанасяне върху различните силициеви пластини които формират масовото производство в големи количества. Вече има съществен напредък в тази област въпреки , че допълнителни подобрения са необходими [9]. Едно специфично предизвикателство е свързано с повишаване на работната честота над 4 GHz, при което слоя AlScN става изключително тънък до 250 nm, при което постигането на дебелинна и функционална равномерност е трудно. При работни честоти над 6 GHz, е по подходящо проектирането на обемни акустични резонатори на базата на композитни многослойни структури с взаимно-обърната поларизация на съседните пиезоелектрични слоеве. Такива структури са ефективни за работа при по-високи хармоници (обертонове) на обемната акустична вълна, като запазват коефициента на електромеханична връзка на приборите и техния качествен фактор Q. В допълнение, поради по-малкия натоварващ ефект на електродите в такива структури, дебелината на AlScN слоевете е значително по голяма в сравнение с приборите на фундаментален резонанс. Това обуславя по добър контрол на процесите който е усвоен добре при нанасянето на по-дебели слоеве AlScN. Много важен аспект на работата при композитни тънкослойни структури на високи обертонове е възможността за подобряване на издръжливостта по мощност, при положение , че устройствата демонстрират високи качествени фактори сравними с компонентите работещи на фундаментален резонанс. Правилата за честотно мащабиране на радиочестотните филтри, изисква използването на резонатори при които отношението на периметъра на електродите спрямо тяхната площ се мащабира както $1/F$ (където F е резонансната честота), площта на електродите се мащабира както $1/F^2$, а обема на резонаторите се мащабира както $1/F^3$. В резултат, компонентите на фундаментален резонанс с приложение при филтри под 7 GHz стават твърде малки като обем, което предполага значително завишени нива на енергийната плътност в устройствата и съответно намалена издръжливост по мощност. Отделно, топлинното съпротивление нараства с намаляването на площта на устройствата при което отделянето на топлината при високи мощности на работа (типично 1 W – 2 W) става затруднено. Не на последно място, отношението между площ и периметър на електродите намалява което прави ефектите свързани с ръба на електрода да доминират работните характеристики на устройствата като намаляват техния качествен фактор и увеличава влиянието на нежелани паразитни вълни. Всичко това мотивира текущото развитие на

технологията към трето поколение базирано на композитни пиезоелектрични мембрани ефективни за работа на по високи обертонове. Понастоящем Akoustis Inc. (SpaceX) е компания, която интензивно развива тази технология за пазара. Технологичните аспекти включват нанасяне на епитаксиални и поликристални слоеве AlScN, техники за обръщане на поляризацията и техники за трансфер на слоеве като част от производството на резонатори и филтри [10]. Тази технология улеснява честотното мащабиране на резонаторите в честотния диапазон между 5 GHz и 15 GHz и е с много добри изгледи по отношение на масовото производство, еволюирайки по този начин към трето поколение резонансна технология на обемни акустични вълни със специфично приложение във високите честоти. Един нов и обещаващ метод за поляризационно инвертиране използва фероелектричното поведение на Sc легиран AlN със Sc концентрация от около 30%. Честотна настройка и превключване на поляризацията на тънкослойни AlScN обемни резонатори бяха напоследък демонстрирани [11].

1.2 Технология на радиочестотните резонатори на повърхнинни микро-акустични вълни

Във времето радиочестотните прибори на повърхнинни акустични вълни еволюираха през три ясно отделени поколения. Започвайки с приповърхнинни акустични вълни (LSAW) разпространяващи се под повърхността на $36^\circ - 48^\circ$ завъртени Y-срезове на LiTaO_3 , преди около 20 години технологията се обнови към температурно компенсирани повърхнинни акустични вълни (TC-SAW) върху 128° Y-срез LiNbO_3 за да еволюира преди 10 години до многослойна структура на повърхнинни акустични вълни (I.H.P SAW) разпространяващи се на повърхността на пиезоелектрик върху диелектрик (POI) композитни подложки [12]. Обикновено, пиезоелектрика е под формата на тънък слой от LiTaO_3 или LiNbO_3 монокристал със завъртян Y-срез на кристала. По своята природа I.H.P SAW технологията принадлежи към класа на вълните на Love. По специфично, това представляват акустични вълни с доминираща напречна поляризация заловени към повърхността посредством слой със скорост на акустичната вълна по малка от тази на обемния материал под слоя, В случая това е комбинация от тънък слой LiTaO_3 пренесен върху силициева подложка. Важно предимство на технологията на повърхнинните акустични вълни е в това, че честотното мащабиране на устройствата се извършва посредством фото литография, докато дебелината на подложката не е от значение. Вълните се възбуждат посредством насрещно гребеновидни преобразуватели (IDT), чийто период 'p' определя резонансната честота приблизително като $F=V/(2p)$, където V е скоростта на повърхнинната акустична вълна. Третото технологично поколение повърхнинни акустични вълни в момента доминира пазара на

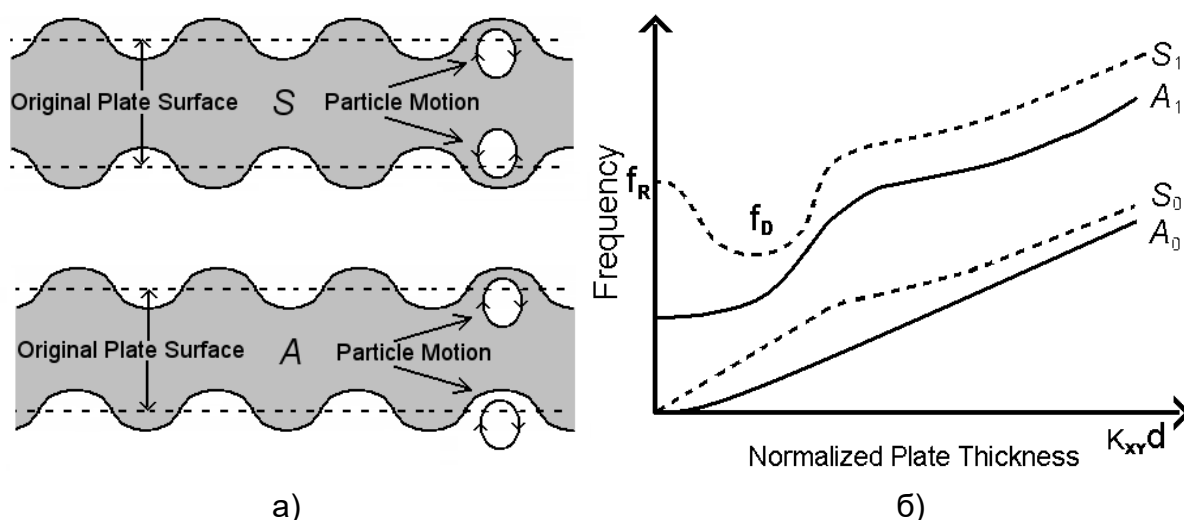
телекомуникационни филтри при честоти до 3 GHz, като показва работни характеристики сравними и често надвишаващи тези на тънкослойната резонансна технология на обемни акустични вълни при по ниска себестойност. За да се стигне до тук обаче изследванията на повърхнинните акустични вълни включваха подобряване на качествения фактор и намаляване на температурната чувствителност на компонентите от второто технологично поколение. Също така, значими изследвания бяха извършени по отношение приложението на повърхнинни акустични вълни разпространяващи се върху подложки с високи скорости на акустичната вълна. В такива композитни системи повърхнинните акустични вълни могат да достигнат фазови скорости над 10000 m/s, което е над 2 пъти по голяма скорост от скоростите на LSAW и TC-SAW в конвенционални подложки от LiTaO_3 и LiNbO_3 . Високите скорости на повърхнинните акустични вълни дават възможност за мащабиране на честотите към по високи стойности при използване на конвенционална фото литография. Като част от технологичното съревнование с технологията на обемните акустични вълни беше показано, че AlN/Diamond композитна система демонстрира една от най високите скорости на повърхнинната акустична вълна в природата [13]. Този резултат следва от факта, че повърхнинната акустична вълна на повърхността на диаманта им най високата скорост сред всички останали материали, и по този начин, при комбиниране с пиезоелектричен слой се получава материален носител с пиезоелектрично активна повърхнинна акустична вълна с безпрецедентно висока фазова скорост, която може да се използва във високочестотни резонансни прибори [14]. В рамките на повече от 10 години, това поле доминираше в изследванията на повърхнинните акустични вълни, но практическата реализация се ограничи от липсата на съществен напредък в технологията за нанасяне на диамантни покрития без макро дефекти и с ниска цена. В повечето изследвания се използваше поликристален диамант, който е с ограничен качествен фактор на микроакустичните вълни. В контекста на тези изследвания, беше оценен потенциала на S0 Лембовите вълни в тънки слоеве AlN. Този вид вълна се характеризира с малка дисперсия на вълновото число, фазова скорост от около 10000 m/s и е с ниски загуби при разпространение. Тези характеристики обосноваха разглеждането на S0 Лембовата вълна като обещаваща алтернатива на високо скоростните повърхнинни акустични вълни върху диамант. Това специфично развитие на технологията е разгледано в по-голям детайл в следващата част. Понастоящем изследванията на повърхнинни акустични вълни са фокусирани предимно върху възможността за мащабиране на честотата до 6 - 7 GHz в многослойни композитни системи от типа пиезоелектрик – диелектрик (I.H.P SAW). Една възможност за честотно мащабиране е през прогреса във фото

литографията, който позволява използването на конвенционалните многослойни подложки до честоти от 5GHz [15]. За съжаление, това често налага литография с резолюция отвъд резолюцията на системите работещи в дълбокия ултравиолетов спектър (DUV). Друга възможност, която в момента се проучва, е свързана с използването на LiNbO_3 тънък слой със специфичен срез върху високоскоростна подложка от 4H-SiC. Тази композитна система се проектира така че да бъде ефективна по отношение на възбуждането на надлъжни приповърхнинни акустични вълни (LLSAW) с висок коефициент на електромеханична връзка [16]. Тази акустична вълна, често наричана S0 – подобна, има 50% по-голяма фазова скорост в сравнение с конвенционалните LSAW, TC-SAW, I.H.P SAW и по този начин позволява проектирането на резонатори с 50% по-голяма периодичност на насрещно-гребеновидния преобразувател при същата работна честота. Тази специфична високоскоростна повърхнинна акустична вълна използва 4H-SiC като заместител на диаманта. За разлика от поликристалните диамантни покрития, 4H-SiC е с много висок качествен фактор. Алтернативно, високо-скоростния материал под пиезоелектричния слой може да бъде заменен с разпределен акустичен отражател от Bragg тип [17]. Тези технологични разработки се проучват в момента и при успех биха могли да предложат решения за широколентови телекомуникационни филтри в честотните ленти n79, Wi-Fi 5, Wi-Fi 6.

1.3 Технология на радиочестотните тънкослойни резонатори на Лембови микро-акустични вълни

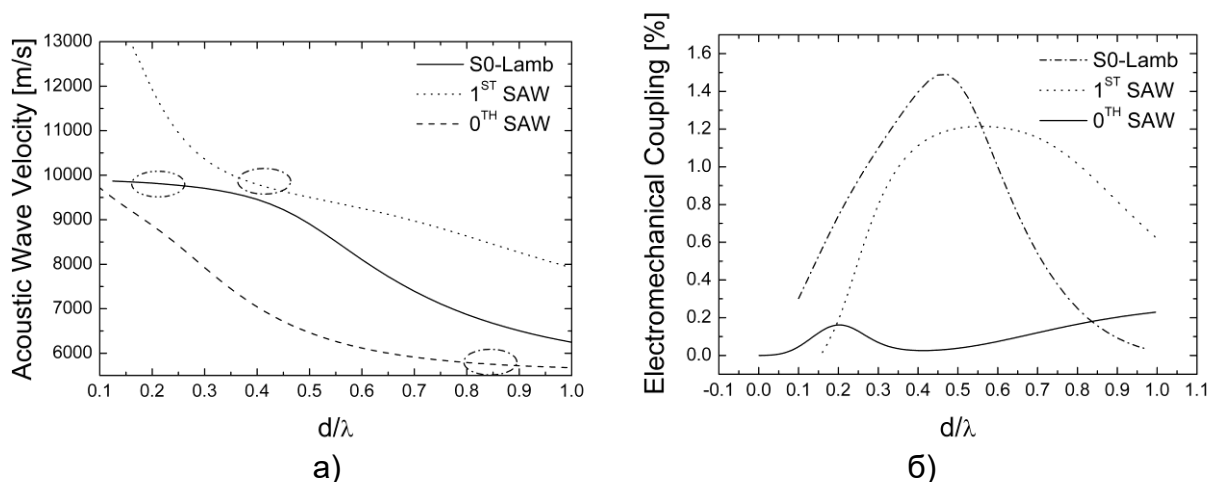
Въпреки , че разглеждаме три отделни микроакустични технологии, на практика те имат общ физичен фундамент. И в трите се използват микроакустични вълни които са вълноводни в средата и по този начин са способни да задържат енергията в ограничена пространствена област. На фигура 1.1 са показани дисперсионните характеристики на вълните на Лемб от двата най-ниски порядъка, които се разпространяват в пластина с дебелина 'd'. Страничното вълново число $K_{xy}=2\pi/\lambda$ се дефинира от дължината на вълната λ по продължение на пластината. Лембовата вълна A0, представляваща антисиметричната Лембова вълна от най-нисък порядък е вълната с най-ниска фазова скорост в пластината и се характеризира с предимно вертикално напречна поляризация. Лембовата S0 вълна, представляваща симетричната Лембова вълна от най-нисък порядък, е високо скоростна и ниско дисперсионна вълна когато се разпространява в акустично тънки пластини. Фазовата скорост на S0 вълната доближава скоростта на обемната надлъжно поляризирана плоска монохроматична вълна в средата, която е винаги най-високоскоростната плоска монохроматична вълна. Лембовата A1

вълна, представляваща антисиметрична Лембова вълна от първи порядък, възниква от фундаменталния резонанс на напречната плоска вълна по дебелина на пластината. Този вълнов вид има критична честота съвпадаща с фундаменталната резонансна честотата на плоската напречна вълна. Лембовата S_1 вълна, представляваща симетрична Лембова вълна от първи порядък, възниква от фундаменталния резонанс на надлъжната плоска вълна по дебелина на пластината. Този вълнов вид има критична честота f_D по малка от фундаменталната резонансна честотата на плоската надлъжна вълна f_R . В случая на акустично дебела пластина ($K_{xy}d \gg 1$) дисперсионните криви на всички Лембови вълни се доближават към дисперсията на повърхнинната акустична вълна в полу-безкрайна среда. Така, повърхнинните акустични вълни представляват граничен случай на Лембовите вълни в полу-безкрайна среда, докато обемните акустични вълни представляват граничен случай на Лембова акустична вълна при $K_{xy}=0$ (безкрайна странична дължина на вълната (λ)).



Фигура 1.1 Лембови вълни от нисък порядък в акустично тънки пластини а) Поляризация на Лембовите вълни б) Дисперсия на Лембовите вълни

Както е отбелязано, тънкослойната резонансна технология на Лембови акустични вълни е изобретена в опит да се решат проблеми свързани с мащабирането на честотата при повърхнинните акустични вълни. По тази причина, първите прототипирани устройства [1, 2] използват S_0 вълни на Лемб разпространяващи се в тънка мембрана от пиезоелектричен AlN, който се знае като материал с висока скорост на надлъжно поляризираната плоска обемна вълна. В частност S_0 демонстрира фазова скорост от около 10 000 m/s в комбинация със слаба дисперсия при разпространение в акустично тънки пластини [18]. На практика, S_0 вълната в AlN мембрани демонстрира по-слаба дисперсия на скоростта и по висок коефициент на електромеханична връзка в сравнение с вълната на Sezawa от първи порядък (повърхнинна акустична вълна) върху AlN/Diamond/Si подложка [18].



Фигура 1.2. Характеристики на разпространение и възбуждане на бързи акустични вълни в тънкослойни структури на AlN а) Дисперсия на скоростта б) Коефициент на електромеханичната връзка

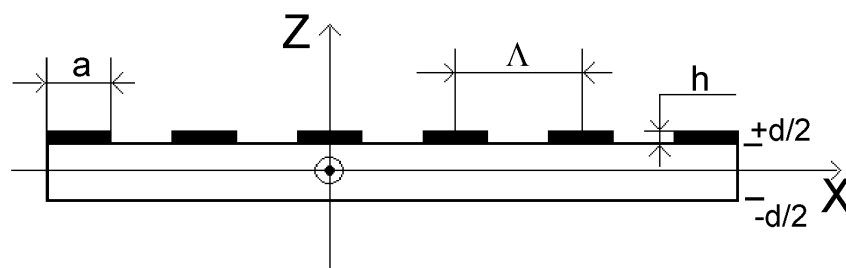
На фигура 1.2 са показани пресметнатите дисперсионни характеристики на фазовата скорост и коефициента на електромеханична връзка, използвайки метода на Adler [19], за първите две повърхнинни вълни на Sezawa в композитна структура ALN/Diamond в сравнение с Лембовата S0 вълна на Лемб в AlN тънкослойна мембрана. Най-нискочестотната (нулева) повърхнинна вълна на Sezawa демонстрира намалена дисперсия (т.е. намалена чувствителност по отношение толерансите в дебелината на слоя) при дебелини на AlN по-големи от 0.8λ , но в същото време се характеризира със сравнително ниска фазова скорост. Повърхнинната вълна на Sezawa от първи порядък се характеризира едновременно с намалена чувствителност към дебелината на слоя и висока фазова скорост при дебелини на AlN слоя между $0.4\lambda - 0.5\lambda$. Лембовата S0 вълна демонстрира слаба дисперсия на фазовата скорост за дебелини на мембраната $<0.3\lambda$, като същевременно скоростта на вълната е висока. Повърхнинната вълна на Sezawa от първи порядък и Лембовата S0 вълна имат сравними коефициенти на електромеханичната връзка, значително по-големи от този на повърхнинната вълна на Sezawa от нулев порядък. При дебелини на AlN от около 0.4λ вълната на Sezawa от първи порядък се характеризира с почти максимално възможният коефициент на електромеханична връзка в комбинация с намалена дисперсия на фазовата скорост. Лембовата S0 вълна достига максимум на коефициент на електромеханична връзка при дебелини на AlN от около 0.45λ при възбуждане с насрещно гребеновиден преобразувател. Други топологии на възбуждане на S0 вълната демонстрират значително по-високи коефициенти на електромеханична връзка при по-тънки AlN с дебелина $<0.3\lambda$.

В процеса на изследванията в тази дисертация, редица предимства на Лембовата S0 вълна бяха разкрити по отношение на приложения свързани с честотни генератори и датчици. Независимо от първата публикация по темата [1], Френската MEMC фирма STMicroelectronics публикува оригиналната си работа по същата тема половин година по-късно [20], която беше последвана от независима публикация на групата на Проф. A. Pisano's от University of California Berkeley, USA [21,22]. Така се даде начален тласък на изследванията в областта на тънкослойните Лембови резонатори в които се включиха много млади учени защитили в последствие кандидатски дисертации и придобили значими академични и индустриални позиции. Приложението на това първо поколение тънкослойна Лембова технология в радиочестотни телекомуникационни филтри остана ограничено поради ограниченията в коефициента на електромеханична връзка, които не са достатъчни за покриването на спецификациите в телекомуникациите, за разлика от технологията на базата на обемни акустични вълни [23]. Около 5 години след изобретяването на тънкослойните Лембови резонатори, фокуса започна да се измества към устройства както с възможност за мащабиране на честотата така и със значително по-голям коефициент на електромеханичната връзка, който да позволи проектирането на устройства с широка честотна лента между резонанс и антирезонанс. Тази необходимост се обуслови от изискванията на петото поколение телекомуникации, което приоритизира широколентови филтри над 4GHz с лента на пропускане от 10% и нагоре. Тези изисквания баяха първоначално удовлетворени от технологията на обемните акустични вълни чрез употребата на Sc легиран AlN със Sc концентрации надвишаващи 30%. През 2010 значим скок беше осъществен посредством Лембовата технология. За пръв път M. Kadota et. al [24] проектираха и прототипираха Лембови резонатори над 4GHz със сравнително широка честотна лента между резонанса и антирезонанса от около 7%. Тези устройства бяха базирани на първият антисиметрична Лембова вълна A1 разпространяващ се в тънкослойна мембрана от епитаксиално израснат с-ориентиран LiNbO₃. 7 години по-късно, с напредването в технологиите за трансфер на монокристални субмикрометрични слоеве [25], тази концепция беше преоткрита като MEMC структура със свободно стоящи ръбове на резонансната област и стеснени електроди на преобразувателя [26], Комбинирайки концепцията на стеснените електроди с напълно захванатата мембранна структура на Kadota, се постигна резонатор с мащабируемост проводимост и висок коефициент на електромеханичната връзка [27]. Тези първи прототипи на резонансни устройства се характеризираха с високо топлинно съпротивление дефинирана от лошата топлинна проводимост на LiNbO₃ и твърде тънките и тесни електроди в преобразувателя, които не можеха да

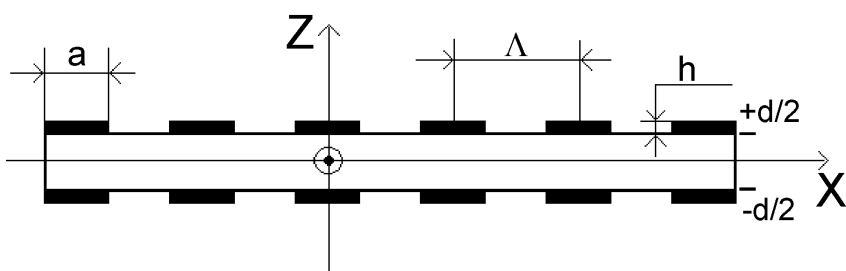
осигурят ефективен път за топлоотделяне. Така, тези устройства не бяха годни за употреба при мощностите които се изискват в модерните телекомуникационни системи. При последващите скове в технологията, се изобретиха структури с дебели електроди и запазени работни характеристики [28], което доведе до възможността за проектирането и прототипирането на първият самосъгласуван широколентов Лембов филтър за честотна лента n79 (4.4GHz – 5GHz) [29]. В допълнение бяха изобретени специфични срезове на LiNbO_3 , които позволиха допълнително увеличение на лентата на пропускане с около 30% от номинала [30]. Тези постижения оформиха второто поколение тънкослойна Лембова технология като стана възможно проектирането и прототипирането на филтри за 5 Wi-Fi и 6 Wi-Fi. В последните 5 години, Лембовите тънкослойни резонатори се превърнаха в изключителна актуална тема за изследвания в контекста на високите честоти и широките филтрови ленти. Проучванията включват, широколентови устройства на базата на S_0 вълни на Лемб в LiNbO_3 [31], S_0 -подобни повърхнинни акустични вълни [32], SH_0 напречни пластинчати вълни [33] както и SH_1 напречни пластинчати вълни [34]. Трябва да се отбележи, че Лембовите вълни от практически интерес се разпространяват в акустично тънки пиезоелектрични мембрани (т.е $d/\lambda < 1$) поради уникалните характеристики на възбуждане и разпространение в тази технологична рамка.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ НА РАЗПРОСТРАНЕНИЕТО И ГЕНЕРИРАНЕТО НА S_0 ВЪЛНИ НА ЛЕМБ В ПЕРИОДИЧНИ СИСТЕМИ

2.1 Анализ на разпространението на S_0 вълни на Лемб под периодични електродни структури



(a)



(b)

Фигура 2.2. Пластини с периодични структури. а) едностранно формирани б) двустранно формирани

В тази част е направен анализ на структурите скицирани на фигура 2.2. За целта се търси общо решение на компонентите на акусто-електричното поле съгласно теоремата на Floquet-Bloch както следва:

$$\begin{cases} u_1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^3 \theta_{i,n} A_{i,n} [\cos(\alpha_{i,n}z) - \tau_{i,n} \sin(\alpha_{i,n}z)] e^{-j\beta_n x} \\ u_3 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^3 \theta_{i,n} B_{i,n} [\sin(\alpha_{i,n}z) + \tau_{i,n} \cos(\alpha_{i,n}z)] e^{-j\beta_n x}, \\ \varphi = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^3 \theta_{i,n} C_{i,n} [\sin(\alpha_{i,n}z) + \tau_{i,n} \cos(\alpha_{i,n}z)] e^{-j\beta_n x} \end{cases} \quad (2.6)$$

където $\beta_n = \beta + \frac{2\pi n}{\Lambda}$ (Λ е периода на решетката), n -тия ($n \in (-\infty \div \infty)$) пространствен хармоник на вълновото число, β е вълновото число на Floquet, $\alpha_n(\beta_n)$ е вълновото число по оста Y на n -тия пространствен хармоник. За всеки хармоник, трите компоненти на полето $u_1^{(n)}$, $u_3^{(n)}$ и $\phi^{(n)}$ са свързани чрез вълновите амплитуди A_n , B_n and C_n които са решение като собствени вектори за определени собствени стойности $\alpha_n(\beta_n)$ на хомогенна линейна система формирана замествайки общото решение в частните диференциални уравнения на Poisson и на акустичното отместване на частиците в средата. Константите $\theta_{i,n}$ и $\tau_{i,n}$ са собствени вектори на система линейни уравнения свързани с механичните и електричните гранични условия. За улеснение, електричното гранично условие приема нулева плътност на заряда по повърхността, докато механичните гранични условия са приложени съгласно приближението от първи порядък на Datta-Hussinger [36,37]. В това приближение, вертикалните механични напрежения на повърхността на пластината зависят линейно от дебелината на електродите h в пертурбиращата решетка както следва:

$$T_{31}^{Strip} = h \left\{ u_1 \rho' \omega^2 + c' \left[\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial u_1}{\partial x} \left[\delta(x + \frac{\eta\Lambda}{2}) - \delta(x - \frac{\eta\Lambda}{2}) \right] \right] \right\}, \quad 2.11a$$

$$T_{33}^{Strip} = u_3 \omega^2 h \rho', \quad 2.11b$$

където h е дебелината на електродите в периодичната решетка, ρ' е плътността на масата на електродите, $\eta=a/\Lambda$ е коефициента на метализация на решетката, $c'=4\mu'(\lambda'+\mu')/(\lambda'+2\mu')$, λ' , μ' са ефективната еластична константа и константите на Lamé на електродите.

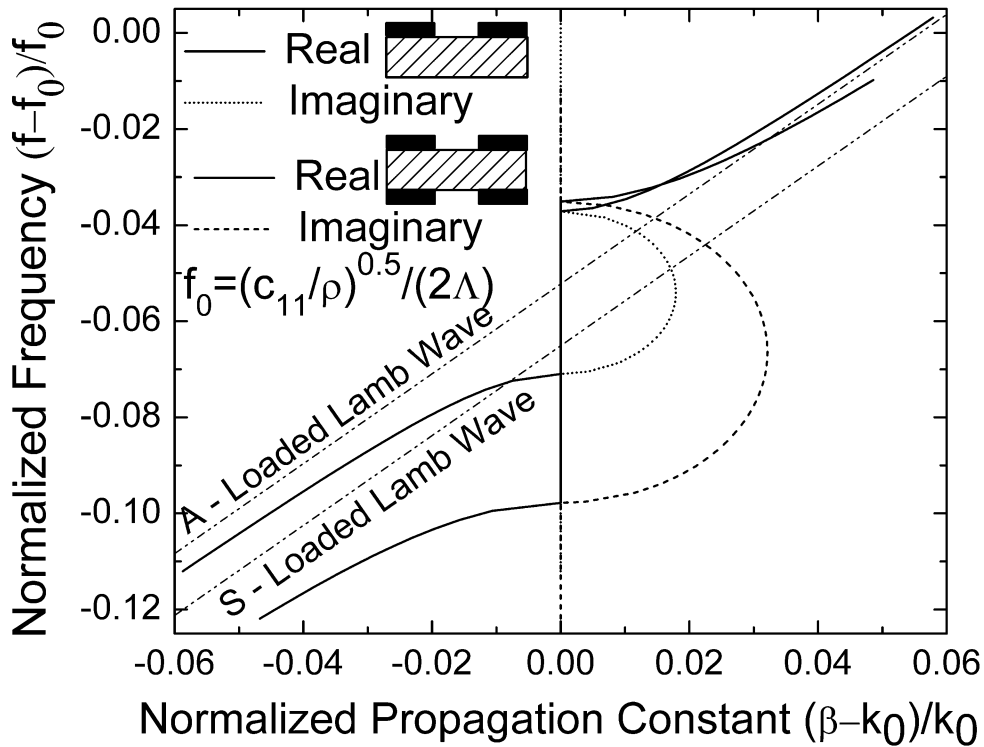
Замествайки общите решения в уравненията свързани с граничните условия, се получава система от $3 \times n$ линейни уравнения:

$$\begin{aligned} \gamma^S \theta_{i,n} \Psi_{i,n}(\beta) &= \frac{h \rho'}{\Lambda \rho} c_{LB} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \theta_{i,q} A_{i,q} \cos(\alpha_{i,q} \pi d / 2\Lambda) \frac{\sin(q-n)\pi\eta}{(q-n)} \left\{ \omega^2 - \right. \\ &\left. \frac{\rho}{\rho'} \frac{c'}{c_{LB}} \beta_q \left[\beta_q - 2(q-n) \right] \right\}, \end{aligned} \quad 2.14$$

$$\gamma^S \Theta_{i,n} \Gamma_{i,n}(\beta) = -\frac{h}{\Lambda} \frac{\rho'}{\rho} \omega^2 c_{LB} \frac{\sin(q-n)\pi\eta}{(q-n)} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^3 \Theta_{i,q} B_{i,q} \sin(\underline{\alpha}_{i,q} \pi d / 2\Lambda),$$

$$\gamma^S \Theta_{i,n} \Omega_{i,n}(\beta) = 0,$$

която се решава в приближение на две свързани вълни ($n=0, -1$), интерпретирани като входяща и отразена вълна от структурата. В резултат се получават дисперсионните характеристики на вълновото число на Floquet $\beta(\omega)$.



Фигура 2.3 Сравнение между дисперсионните зависимости на S0 вълни в едностранно и двустранно формирани периодични електродни структури. Означенията "S-Loaded" и "A-Loaded" означават съответно и S0 вълни в двустранно и едностранно масово натоварени пластини без отражения.

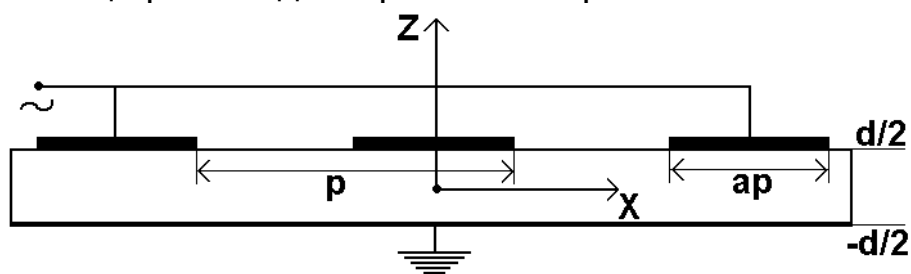
Реалните и имагинерните компоненти на вълновото число са показани на фигура 2.3 като функция на честотата. Показани са две характеристики, съответстващи на несиметрично и симетрично натоварена пластина при една и съща дебелина на пластината и електродите в периодичната решетка. Честотата е нормализирана спрямо централната честота на плоската надлъжна обемна акустична вълна, разпространяваща се по оста X. Центровете на забранените зони съвпадат с централните честоти на пластините с масово натоварване на електродите при изключване на ефекта на отражение от структурите. Чистото масово натоварване на електродите води до известно забавяне на вълната в структурата. Подобен, макар и малко по-различен, ефект се наблюдава в характеристиките на забранената

зона на напречните приповърхнинни вълни в периодични структури. Извън забранената зона дисперсионните криви доближават асимптотично дисперсията на Лембови вълни с хомогенно механично натоварване от изотропен слой. Увеличаването на ширината на забранената зона е показател за увеличено отражение от структурата в случая на симетрично формирани периодични решетки от двете страни на пластината. Промяната на горния ръб на забранената зона е по-слаба в сравнение с долния ръб на забранената зона. Този артефакт се дължи на забавящия ефект на масовото натоварване на решетката, който е очаквано по-слаб в случая на едностранно натоварена пластина в сравнение със симетрично натоварената пластина. Наблюдавания забавящ ефект има относително сложна природа поради различните фактори които действат едновременно. Формирането на периодична решетка от електроди от една страна увеличава ефективно дебелината на пластината, което само по-себе си води до намаляване на фазовата скорост на вълната. Друг забавящ ефект е свързан с по-ниската скорост на разпространение на вълните в металните електроди (предимно от Al). В допълнение, отражението на структурата допринася за допълнително забавяне на вълната на долния ръб на забранената зона и за относително увеличение на скоростта на горния ръб на забранената зона. По този начин, поведението на забранената зона е резултат от едновременно действащи процеси с различен произход. Така, чувствителността на долния ръб на забранената зона може да бъде много по-силна отколкото чувствителността на горния ръб на забранената зона. Наблюдаваното поведение е от основно значение при проектирането на резонансни структури на Лембови акустични вълни. Добре известно е, че такива устройства оперират на честоти в забранената зона, което позволява ефективно залавяне на енергията в структурата. В забранената зона на безкрайна периодична решетка отражението на вълната е с амплитуда равна на 1 и фаза в диапазона $(0 \div \pi)$. В зависимост от приложението се проектира позицията на резонансната честота в забранената зона. Когато устройството би се използвало като датчик, изглежда по-ефективно да се проектира устройство с резонансна честота по-близо до долния ръб на забранената зона, където чувствителността на устройството е най-голяма. Когато се проектира устройство за честотен контрол, специално внимание се обръща на намаляване на влиянието на производствените толеранси върху резонансната честота. Следователно, такова устройство е добре да се проектира с резонансна честота в околност на горния ръб на забранената зона, който показва по-слаба чувствителност. С подходящ дизайн, чувствителността на горния ръб на забранената зона към дебелината на електродите може да се ограничи до нулев първи порядък на зависимостта. Значително подобреното отражение в

симетрично натоварени структури също е от голямо значение понеже пиезоелектричните мембрани са с ограничени размери заради изискванията за надеждност, което то своя страна ограничава броя на електродите в отражателните решетки. Също така, симетрично натоварените структури демонстрират значимо намаляване на чувствителността на горния ръб на забранената зона в сравнение с едностранно натоварените пластини. В практиката, симетрично натоварените пластини са по трудни за прототипиране поради структурните дефекти на пиезоелектричния слой които възникват при нанасяне върху ръбовете на електродите [40]. С прогреса в технологията тези проблеми бяха разрешени. Симетрично натоварените структури са също много ефективни при възбуждането на S_0 и S_1 Лембови вълни, което обуславя продължаващия научен интерес към тяхното разработване [41].

2.2 Квази-статичен анализ на възбуждането на S_0 вълни на Лемб под периодични електродни структури

Наред с общия квази-статичен анализ на насрещно гребеновидни преобразуватели, специфичен научен принос се състои в прилагането на функциите на Green в анализа на периодична решетка от преобразуватели на надлъжни акустични вълни. Тези преобразуватели са с двойно по-голяма периодичност в сравнение с насрещно гребеновидните преобразуватели при една и съща дължина на вълната и изискват специфично адаптиране на теорията.



Фигура 2.6 Схематично представяне на преобразувател съставен от периодична поредица от успоредно свързани преобразуватели на надлъжна акустична.

На фигура 2.6 е показана структурата на такъв преобразувател с период 'p' който е приблизително равен на дължината на акустичната вълна λ . Използвайки приближението на Ingebrigtsen, функцията на Green за S_0 вълна на Лемб се извежда като:

$$G_{Lamb}(x) = j\Gamma_s \exp(-jk_0|x|), \quad 2.19a$$

$$\Gamma_s \approx [2\varepsilon_s(\infty, k_0 d)]^{-1} k_{Lamb}^2, \quad 2.19b$$

където $k_{Lamb}^2 = 2(V_{oc} - V_{sc})/V_{oc}$ е материалния коефициент на електромеханична връзка, V_{oc} и V_{sc} са скоростите на Лембовата вълна при повърхност съответно с нулев електричен заряд и с нулев

електричен потенциал. Използвайки така дефинираната функция на Green, реалната компонента на проводимостта $G(\omega)$ изведена чрез пренасяната мощност от Лембовата вълна се дефинира като [46]:

$$G(\omega) = \omega W \Gamma_s |\hat{Q}_e(\beta)|^2 \text{ at } \beta=k_0, \quad 2.20$$

където W е апертурата на преобразувателя, докато плътността на заряда $\hat{Q}_e(\beta)$ е Fourier трансформацията на плътността на заряда $Q_e(x, \omega)$, дефиниран като пространствената плътност на заряда $\sigma(x, \omega)$ при 1V приложено на напрежение върху електродите. В случая на разглеждания преобразувател, разпределението на заряда върху електродите е симетрично и близко до равномерно [47]. Така $Q_e(x, \omega)$ в приближение на равномерно и симетрично разпределение на заряда се изчислява като:

$$Q_e(x, \omega) := \sigma_0 \sum_{n=1}^N U(\tau_n + p \cdot a/2) U(p \cdot a/2 - \tau_n), \quad 2.21$$

където $U(x)$ е единична стъпаловидна функция, N е броя на пръстите в преобразувателя, а σ_0 е константа пресметната чрез заряда формиран върху електрода при 1V напрежение върху пръст от решетката с капацитет $C_s = \epsilon_{33} a p W / d$. В последствие се извежда следния израз за Fourier компонентата $\hat{Q}_e(\beta)$

$$\hat{Q}_e(\beta) = \frac{2\sigma_0}{\beta} \sin(k_0 a p / 2) \frac{\sin(N \beta p / 2)}{\sin(\beta p / 2)} e^{j(N-1)\beta p / 2}, \quad 2.22$$

където $\sigma_0 = \epsilon_{33} / d$. Замествайки (2.22) в (2.20), проводимостта се дефинира като:

$$G(\omega) = 4C_s k_{EFF}^2 f_0 \sin^2(k_0 a p / 2) \left| \frac{\sin(N k_0 p / 2)}{\sin(k_0 p / 2)} \right|^2, \quad 2.23a$$

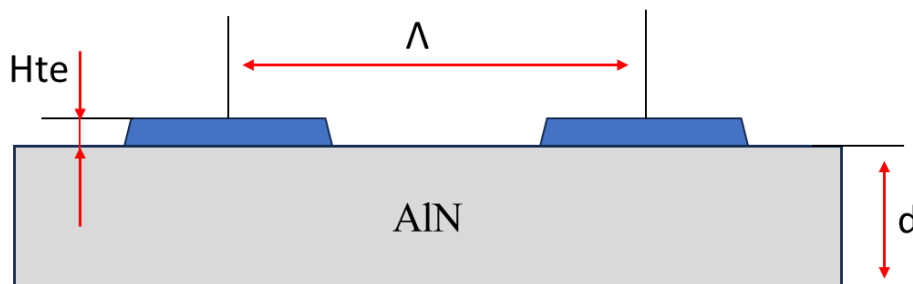
$$k_{EFF}^2 = \frac{1}{2a} \frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_S(\infty, k_0 d)} \frac{k_{Lamb}^2}{k_0 d}, \quad 2.23b$$

където k_{EFF}^2 е коефициента на електромеханична връзка на преобразувателя, дефиниран при $\beta=2\pi/p$. Уравнение 23а е в съответствие с изразът предсказан от еквивалентното електрично представяне на преобразувателя [48]. В случая обаче формулата задава фундаменталната връзка на електрическата проводимост и параметрите на преобразувателя, като дава възможност за оптимизиране на електромеханичната връзка на преобразувателя чрез неговата топология.

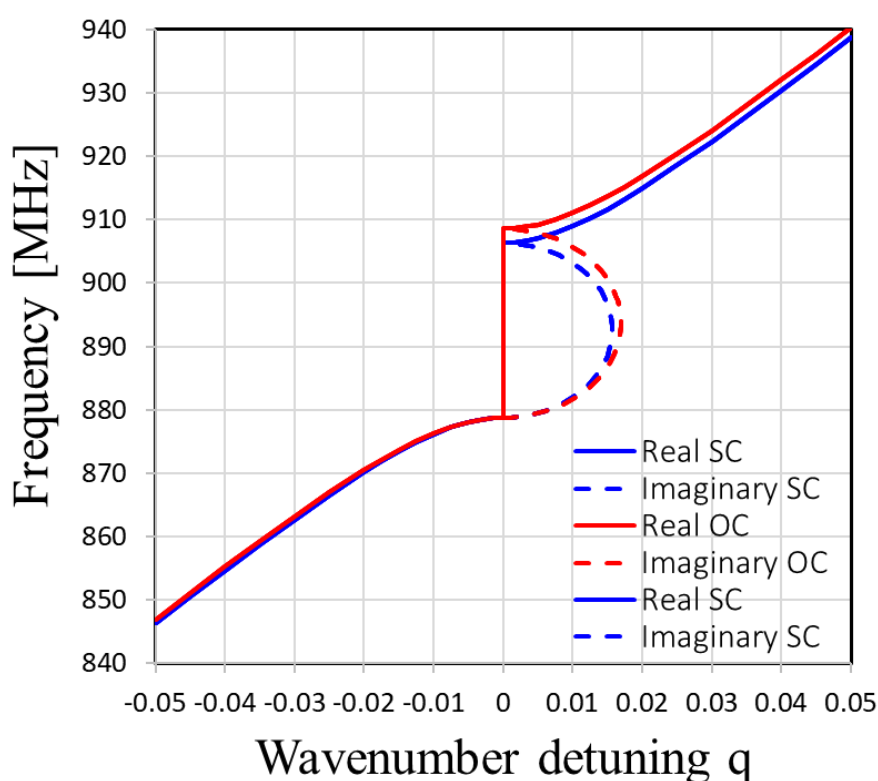
2.3 Анализ на S0 Лембови резонансни структури посредством метода на крайните елементи

В тази част са представени разработени алгоритми за анализ посредством метода на крайните елементи. Резултатите са осмислени през сравнение с аналитичните методи развити в предходните части на главата. Въведен е нов модел на периодичната клетка, който позволява бърз и ефективен анализ на основните характеристики на Лембовите

вълни. Модела е скициран на фигура 2.11 и представлява сегмент от устройство на Лембови вълни с дължина два периода на електродната решетка. Периодичните гранични условия са дефинирани съобразно теоремата на Floquet-Bloch, като по този начин модела представлява вариация на моделите от предните две части и позволява директно сравняване. Един аспект от моделирането използва анализ на собствените честоти, който се адаптира към извеждането на дисперсията на вълновото число на вълната.



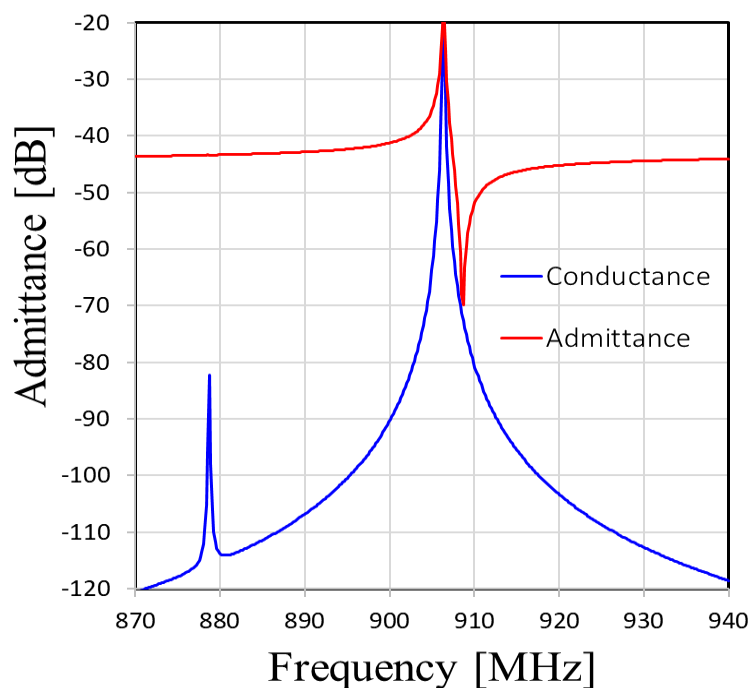
Фигура 2.11 Периодична клетка на насрежно гребеновиден преобразувател



Фигура 2.12а Дисперсионни характеристики на S0 вълна на Лемб разпространяваща се под метална периодична решетка. $q=(\beta-\pi/\Lambda)/(\pi/\Lambda)$

На фигура 2.12а са показани дисперсионните зависимости на вълновото число, получени посредством анализ на собствените честоти за периодични метални решетки със занулен електричен потенциал (SC) и със занулен заряд (OC). Метода дава възможност за изследване на забранената зона и може да бъде сравнен с Floquet-Bloch анализа развит в първата част. Важен

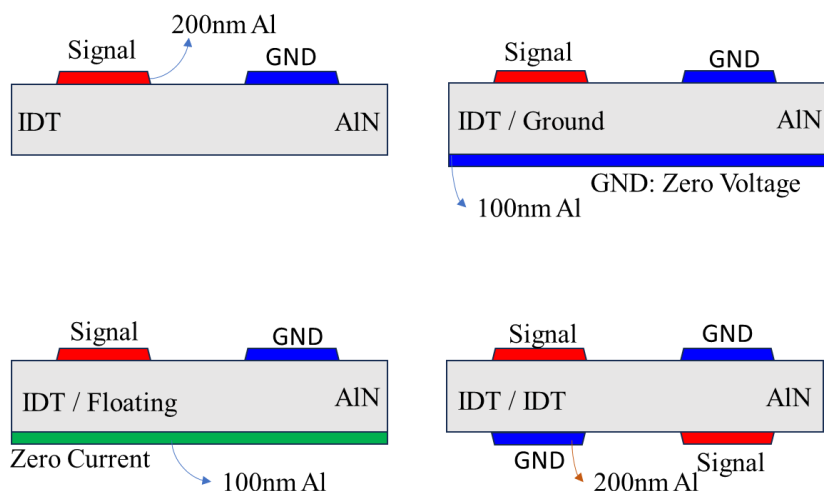
допълнителен детайл в случая е промяната в горния ръб на забранената зона в зависимост от наложеното електрично гранично условие. Последното е индикатор за наличието на електромеханична връзка, като честотата на горния ръб в SC конфигурация съответства на резонанса в системата, а честотата на горния ръб в ОС система съответства на антирезонанса. В допълнение, изследването на периодичната клетка се обогати с анализ на честотния отклик на системата. Въведена беше периодична проводимост на структурата, която представлява проводимостта на два електрода в безкрайна система от електроди в насрежно-гребеновидния преобразувател. Идентифицирани са два пика на проводимостта, съответстващи на горния и долния ръб на забранената зона. Минимума в проводимостта дефинира антирезонансната честота в пълно съответствие с анализа на дисперсионните характеристики.



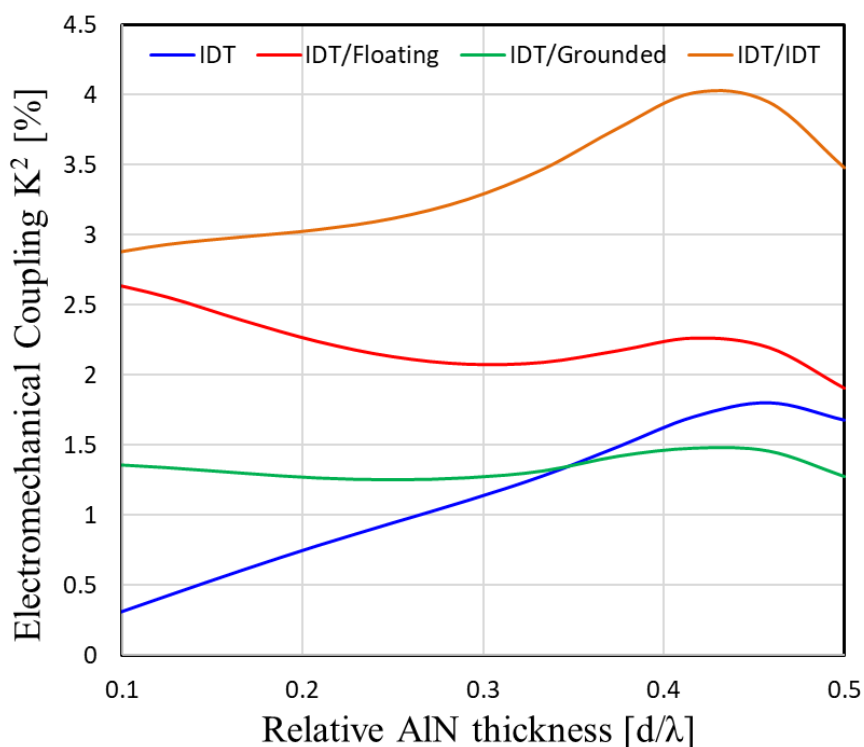
Фигура 2.12б Характеристики на периодичната проводимост

Така предложените аналитични инструменти са използвани за анализ на коефициента на електромеханична връзка на структури с различна структура на насрежно-гребеновидния преобразувател. Изследвани са четири модификации на преобразувателя, които са скицирани на фигура 2.19а. На фигура 2.19б са показани резултатите от изследването, които определят структурата с два симетрично формирани насрежно-гребеновидни преобразувателя като най-ефективна по отношение на възбуждането на S_0 вълни на Лемб при произволна акустична дебелина на пластината в диапазона до $\frac{1}{2}$ от дължината на вълната. От друга страна, конвенционалният преобразувател с електрично и механично не натоварена долна

повърхност на пластината е най лесния за прототипиране и демонстрира ефективност на възбуждането достатъчна за много от приложенията.



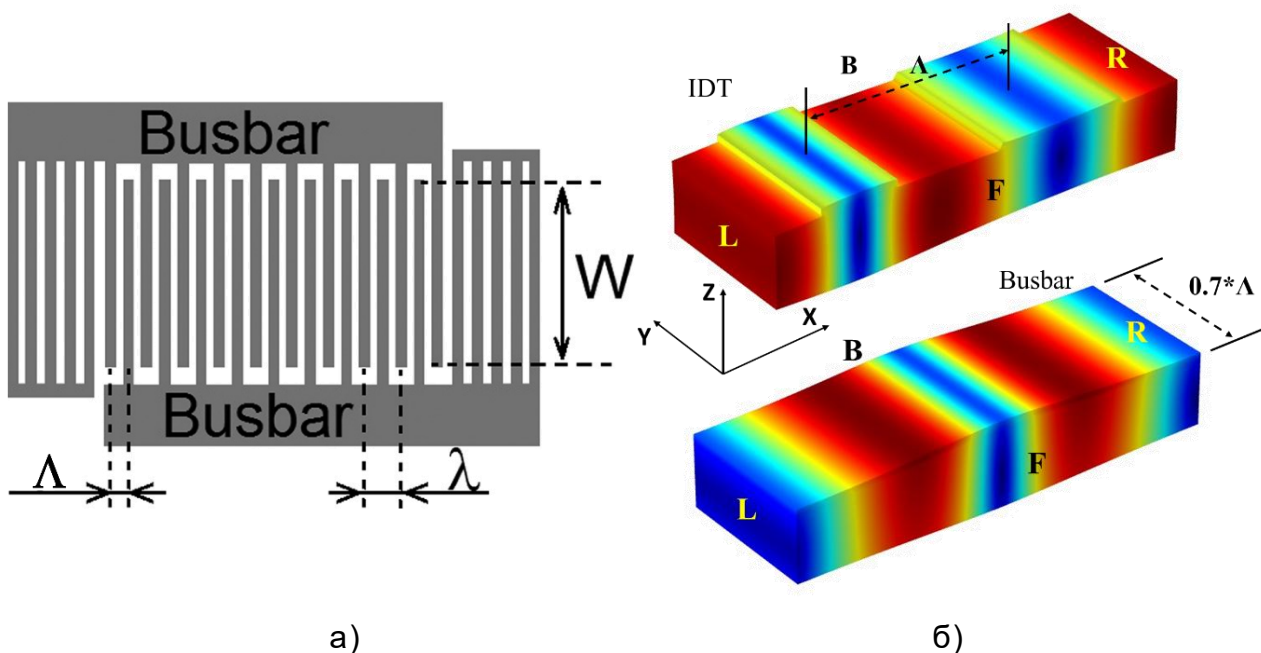
Фигура 2.19а Периодични клетки на различни преобразуватели на S0 Лембова акустична вълна



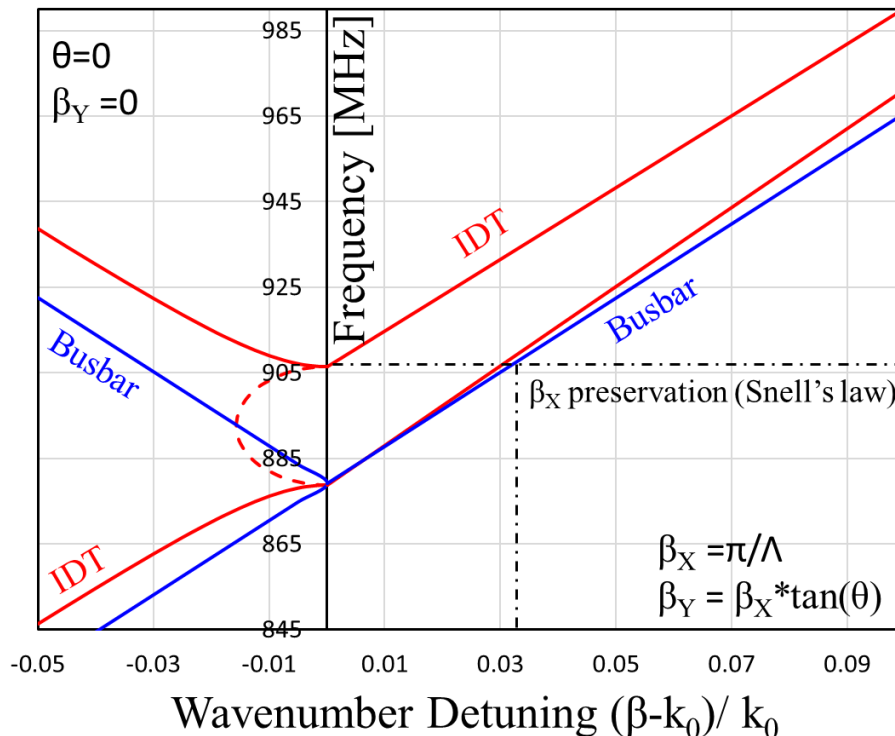
Фигура 2.19б Коефициент на електромеханичната връзка при възбуждането на S0 вълна на Лемб от различни преобразуватели

Метода на крайните елементи беше разширен към анализа на дисперсионните характеристики на Лембовата вълна в равнината на дифракция. Модела представлява анализ на собствени честоти на 3D периодична клетка на която са наложени Floquet-Bloch периодични гранични условия в съответствие със закона на Snell. Това се оказа ефективен метод за изследване на Лембовата вълна разпространяваща се под ъгъл спрямо оста X, позволяващ предварителна оценка на взаимодействието на отделните структури в

Лембовия резонатор. На фигура 2.20 са представени топологиите на резонатор на Лембови вълни и на периодичната 3D клетка. Така например, резонатора се състои минимум от периодични решетки и еклектична метална шина за подаване/отвеждане на сигнала.



Фигура 2.20 Топологии на Лембови вълни а) Резонатор на Лембови вълни б) 3D Периодична клетка



Фигура 2.21 Представяне в редуциран вид на дисперсията на S0 вълни на Лемб разпространяващи се под периодичната електродна решетка и електрическите шини. Сините линии представляват дисперсионните криви под електрическите шини на резонатора, докато червените линии представляват дисперсионните криви под електродната решетка.

Взаимодействието на вълната с тези обекти може да бъде оценена посредством дисперсионните им криви. Резултатите от този анализ са представени на фигура 2.21 в редуцирана зона на Brillouin, която позволява обединяването на фундаменталните характеристики на разпространение на вълната в една графика. В диапазона на отрицателните промени на вълновия вектор са изобразени характеристиките на забранената зона при разпространение по оста X, докато в диапазона на положителните промени на вълновия вектор са представени честотите на вълни разпространяващи се под ъгъл спрямо X оста, при условието на Snell $k_x = \pi/\Lambda$ (т.е константа). Анализа на дисперсионната диаграма се прави в контекста на елементите които изграждат един резонатор на Лембови вълни. Вижда се , че вълната може свободно да излъчва дифракционно от преобразувателя към металните шини при честоти над долния ръб на забранената зона, което определя една недостатъчна вълноводност на структурата и представлява условие за загуба на енергия и съответно влошаване на качествения фактор на такъв резонатор.

2.4 Теория на свързаните вълни за проектиране на резонансни устройства на S0 вълна на Лемб

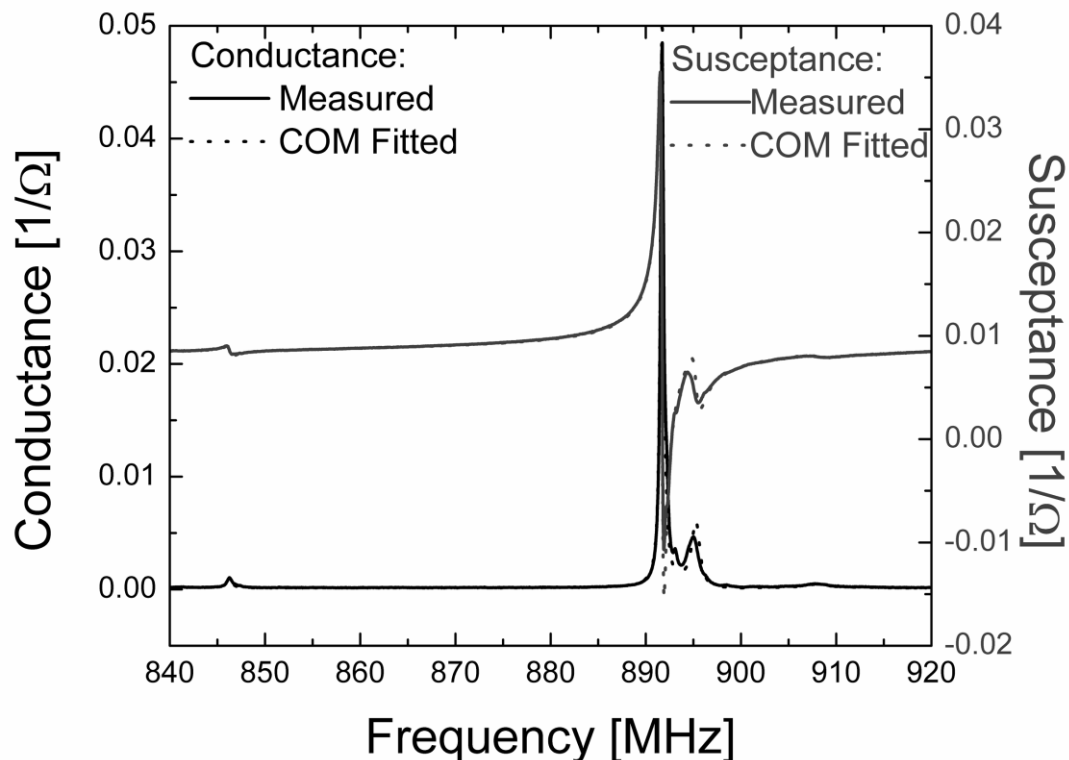
Тази част от дисертацията демонстрира връзката на аналитичните инструменти за анализа на Лембовите вълни с моделирането на реални устройства. За целта, теорията на свързаните вълни, която е широко използвана в проектирането на компоненти на повърхнинни акустични вълни, е адаптирана към проектирането на Лембови устройства. При изпълнението на тази задача се установи съвместимост между параметричното описание предложено от теорията на свързаните вълни и физичните характеристики на Лембовите вълни получени посредством разработените аналитични инструменти. В резултат са представени методи за определяне на нужните параметри както по аналитичен път, така и по емпиричен път чрез апроксимация на предсказаната към измерената проводимост на резонаторите. Теорията на свързаните вълни (COM) се представя от три частни диференциални уравнения както следва [59]:

$$\begin{aligned}\frac{dR(x)}{dx} &= -j\delta R(x) + jk_{21}S(x) + j\alpha V \\ \frac{dS(x)}{dx} &= -jk_{12}R(x) + j\delta S(x) - j\alpha V \quad , \\ \frac{dI(x)}{dx} &= -2j\alpha R(x) - 2j\alpha S(x) + j\omega CV\end{aligned}\tag{2.29}$$

където $R(x)$ и $S(x)$ са бавно променящи полета, които описват амплитудата на две вълни с противоположни посоки на разпространение, $k_{21} = k_{12}$ е параметър на отражението на вълната в периодичните електродни структури, α е параметър на възбуждането

на вълната, C е капацитета на преобразувателя на единица дължина, V е приложеното напрежение върху електродите, $\delta=(\omega/v[\omega])-(\pi/\Lambda)-j\gamma$ е отместване на вълновото число спрямо π/Λ , чиято имагинерна част отразява затихването на вълната поради загуби от разпространение. Тук ω е ъгловата честота, $v[\omega]$ е скоростта на S_0 вълна на Лемб като функция на честотата, $\Lambda=\lambda_0/2$ е периода на електродната решетка, а γ е затихването на вълната. Обикновено, теорията използва нормализирани параметри, както следва:

- $k_P=-k_{21}\cdot\lambda_0$ — безразмерен коефициент на отражение на двойка електроди (т.е на един период на преобразувателя);
- v_{S0} — Непертурбирана фазова скорост на S_0 Лембовата вълна на централната честота $f_0=v_{S0}/\lambda_0$;
- αn — нормализиран коефициент на възбуждане на S_0 вълна на Лемб $\alpha n = \frac{\alpha \cdot \lambda_0}{\sqrt{W/\lambda_0}}$, където W е апертурата на преобразувателя.
- $\gamma_P=\gamma \cdot \lambda_0$ — е вълновото затихване за една дължина на вълната в $[Np/\lambda]$;
- D — е безразмерен коефициент на линейна дисперсия на скоростта ($v[\omega] \approx v_{S0}(1 - D \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0})$), която се извежда от отношението между груповата и фазовата скорост на вълната $D = 1 - v_{GR}/v_{S0}$ на централната честотата ω_0 ;
- $\hat{C}t$ — нормализиран капацитет $\hat{C}t = C\lambda_0/W$ [F/m] (на един период от преобразувателя и единица апертюра).



Фигура 2.23 Измерени спрямо теоретично апроксимираната проводимост на резонатора

Този параметричен модел има аналитично решение и дава възможност за бързо проектиране на компонентите. Неговата адекватност, в случая, е демонстрирана чрез екстракция на параметрите от експериментално измерена проводимост на резонатор на S0 вълни на Лемб. На фигура 2.23 са показани измерената и теоретично апроксимираната проводимости на синхронен резонатор на S0 Лембова акустична вълна. В резултат, са получени моделните параметрите (виж Таблица 2.1), които позволяват проектирането на произволни структури на Лембови акустични вълни.

ТОПОЛОГИЯ: 2 μ m дебел c-AlN, 270nm дебели Al електроди, $\Lambda=6\mu$ m	
COM Параметри:	Стойности
Непертурбирана скорост (v_{S0} [m/s])	10435.05
Дисперсия на скоростта (D)	$3.5 \cdot 10^{-2}$
Нормализиран коефициент на отражение ($ k_P $)	$16.5 \cdot 10^{-2}$
Нормализиран капацитет ($\widehat{Ct}$ [pF/m])	81.9
Нормализиран коефициент на възбуждане (α_P [$\Omega^{-1/2}$])	$13.3 \cdot 10^{-5}$
Затихване (γ_P [Nr/ λ])	$9.48 \cdot 10^{-4}$

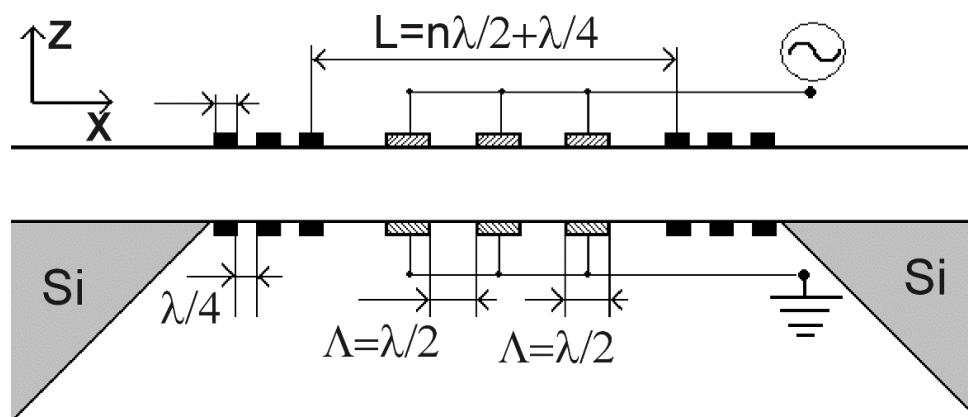
Таблица 2.1 Стойности на експериментално получени параметри на теорията на свързаните вълни (COM)

ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОТОТИПИРАНЕ НА РЕЗОНАНСНИ СТРУКТУРИ НА ЛЕМБОВИ ВЪЛНИ В ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧЕН AlN

Тази глава представлява обширен обзор на изследванията свързани с проектирането, прототипирането и характеризирането на тънкослойни резонатори на Лембови акустични вълни на базата на AlN мембрани. Главата започва с основополагащата първа демонстрация на този тип резонатори и представя еволюцията на това направление в технологията към по добри работни характеристики. Това включва подобрене на качествения фактор, потискане на нежелани паразитни вълни, както и вградена температурна компенсация на резонансната честота. Ядрото на тези изследвания беше публикувано в обзорна статия [23], веднага след представянето им в поканен доклад на 2012 IEEE Int. Ultrasonic Symposium. Изследвани са два основни типа резонатори. Първият тип резонатори използват разпределени отражатели представляващи периодични електродни решетки по повърхността на напълно закрепена AlN мембрана, докато вторият тип резонатори използват фиксирано отражение от свободно стоящите краища на конзолно закрепена AlN мембрана.

3.1 Първият прототип на тънкослоен резонатор на S0 Лембова акустична вълна

На фигура 3.2 е скицирана топологията на тънкослоен резонатор на S0 вълни на Лемб. Тази тестова структура е със симетрично разположени периодични електродни решетки. В централната част е разположен излъчвател от периодично подредени преобразуватели на надлъжна акустична вълна. В двата края, симетрично са разположени разпределени отражатели с период на решетката $\frac{1}{2}$ от периода на излъчвателя. Всички електроди в структурата са с еднаква дебелина. В Таблица 3.1 са обобщени проектните параметри на устройството.

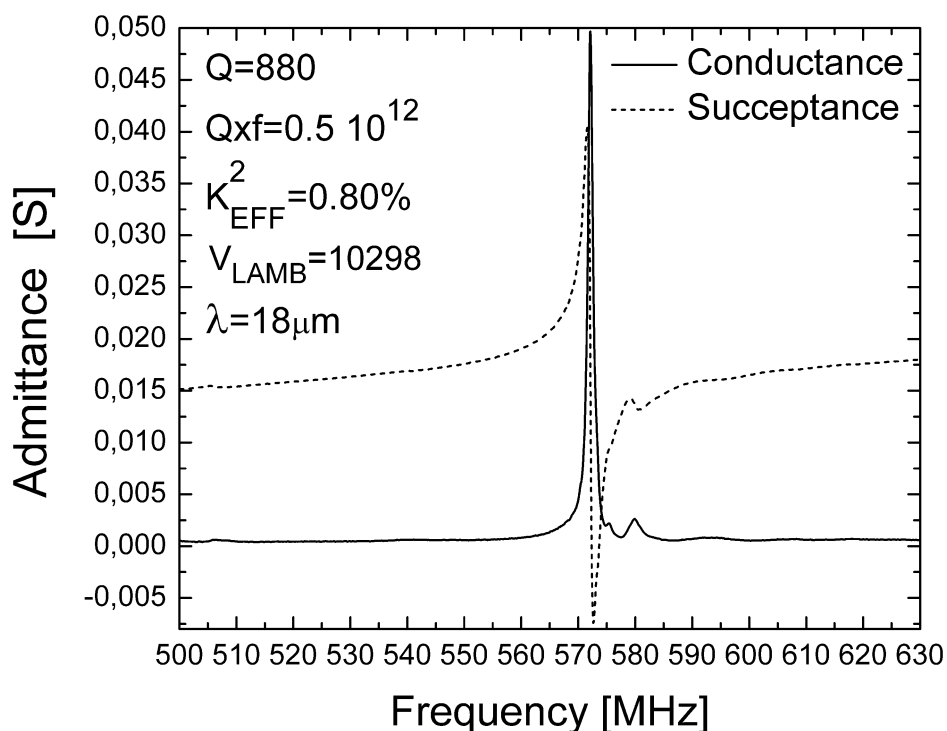


Фигура 3.2. Топология на тънкослоен резонатор на S0 вълни на Лемб.

Дебелина на AlN мембраната d	2 μm
Апертура на резонатора W	350 μm
Дължина на вълната λ	18 μm
Широчина на електродите в отражателите λ/4	4.5 μm
Ширина на електродите в преобразувателите λ/2	9 μm
Коефициент на метализация	0.5
Дължина на резонансната област L	553.5 μm
Брой електроди в отражателите	16
Брой електроди в излъчвателите	30

Таблица 3.1 Проектни параметри на тънкослоен резонатор на S0 вълни на Лемб

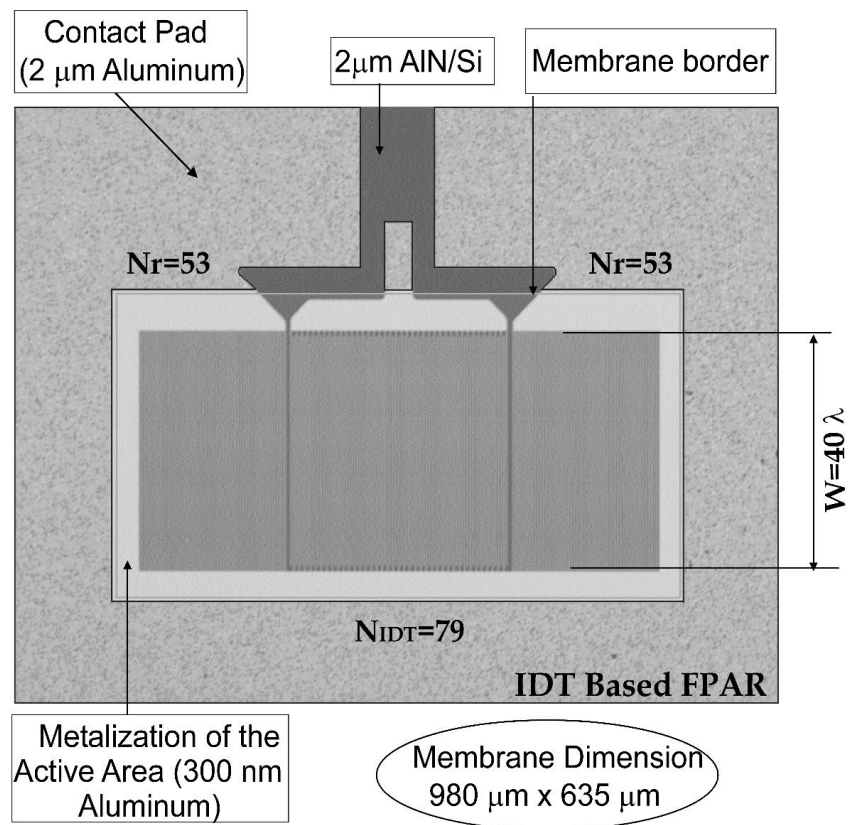
На фигура 3.3 е показна измерената проводимост в близост до резонанса на тънкослойния S0 Лембов резонатор проектиран и прототипиран съгласно Таблица 3.1. Лембовата вълна се характеризира с висока фазова скорост от около 10300 m/s, качествения фактор на резонанса е 880 който дефинира качествен показател $Q \times F = 0.5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$, съизмерим с този на високоскоростни повърхнинни акустични вълни в композитната структура AlN/Diamond/Si [14]. Ефективния коефициент на електромеханична връзка е $K_{EFF}^2 = \frac{0.25\pi^2(F_A - F_R)}{F_R} = 0.8\%$, където F_R и F_A са съответно честотите на резонанс и антирезонанс.



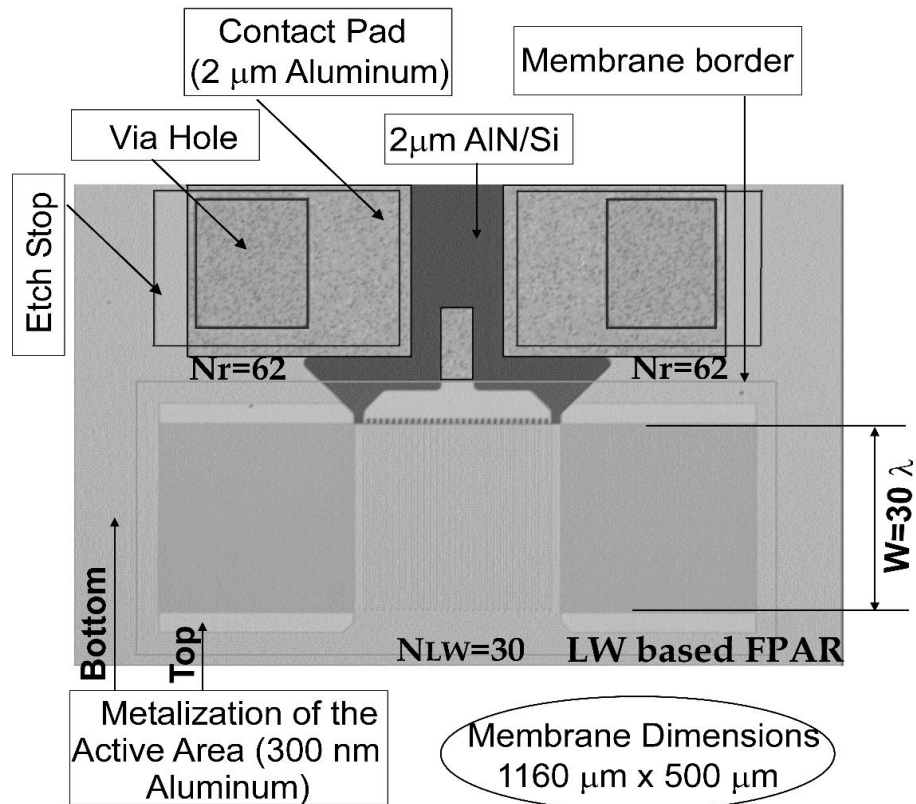
Фигура 3.3 Измерен честотен отклик на първия прототипиран тънкослоен резонатор на S0 вълни на Лемб

3.2 Тънкослойни резонатори на S0 Лембова акустична вълна с подобрени работни характеристики

След като се постигна прогрес в технологията и проектирането, се разработиха второ поколение прототипи на тънкослойни резонатори от Лембов тип. Тези резонатори бяха проектирани с различни преобразуватели. На фигура 3.11 е показана микроскопска снимка на прототипиран тънкослоен резонатор на S0 вълни на Лемб, в който възбуждането на вълната се извършва от насрещно гребеновиден преобразувател със електрически свободна долна повърхност на AlN мембраната. На фигура 3.12 е показана микроскопска снимка на прототипиран Лембов резонатор със излъчвател съставен от периодично подредени преобразуватели на надлъжната акустична вълна с $\lambda/2$ широчина на всеки електрод и период λ . При този тънкослоен резонатор се извършени допълнителни процеси на ецване и метализация, които позволяват свързването на долния непрекъснат електрод към маса. И двата резонатора използват разпределени отражатели от периодични електродни решетки с период $\lambda/2$ върху напълно закрепена мембрана от пиезоелектричен AlN.

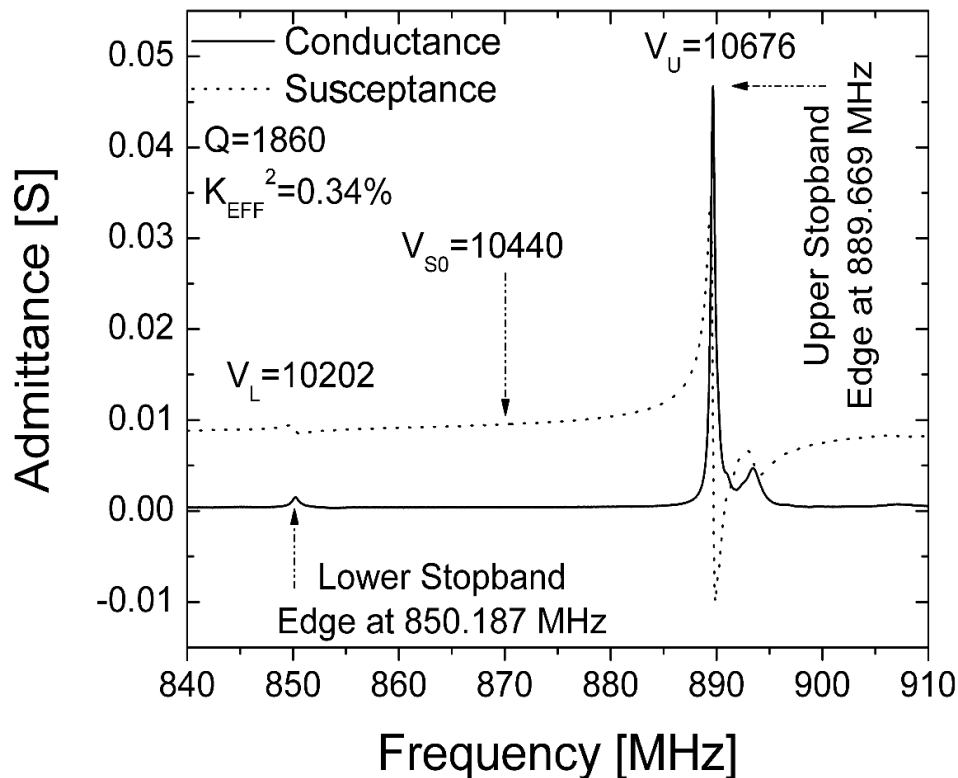


Фигура 3.11 Изглед от горе на прототипиран Лембов резонатор с горен насрежно гребеновиден преобразувател



Фигура 3.12 Изглед от горе на прототипиран Лембов резонатор с периодични преобразуватели на надлъжна акустична вълна.

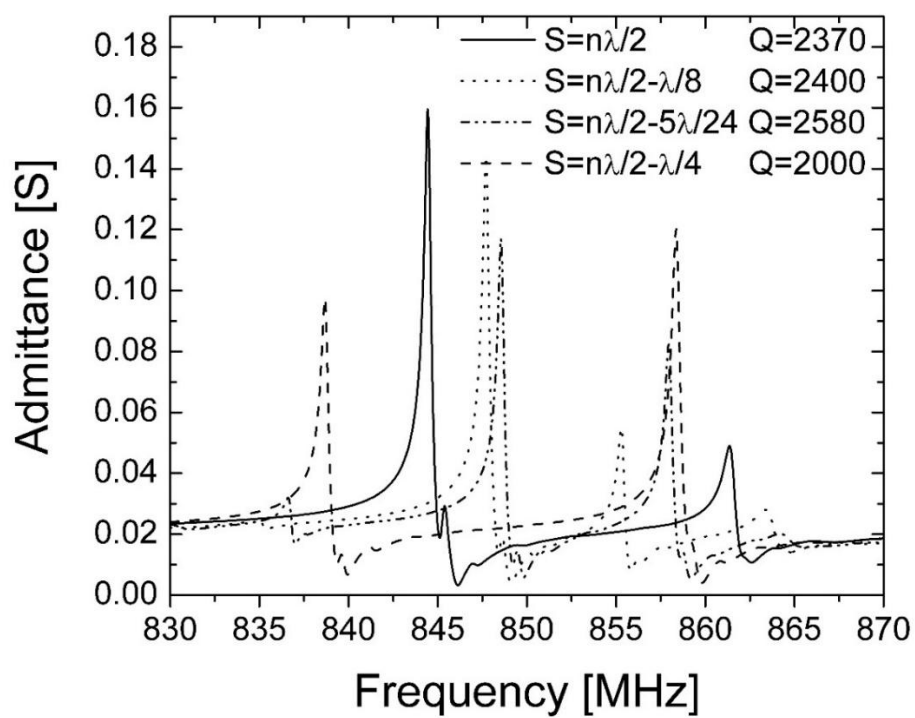
Измерените характеристики на тези резонатори са показани на фигура 3.15 и фигура 3.20. В проводимостта на синхронния резонатор с насрежно-гребеновиден преобразувател (фигура 3.15), ясно се идентифицират долния и горния ръб на забранената зона. Скоростта на Лембовата S0 вълна се определя в средата на забранената зона и надхвърля 10400 m/s. Коефициента на електромеханична връзка на устройството е около 0.34%. Качествения фактор достига 1860, като при асинхронните резонатори от този тип са измерени качествени фактори до 3100 при честота от около 890 MHz.



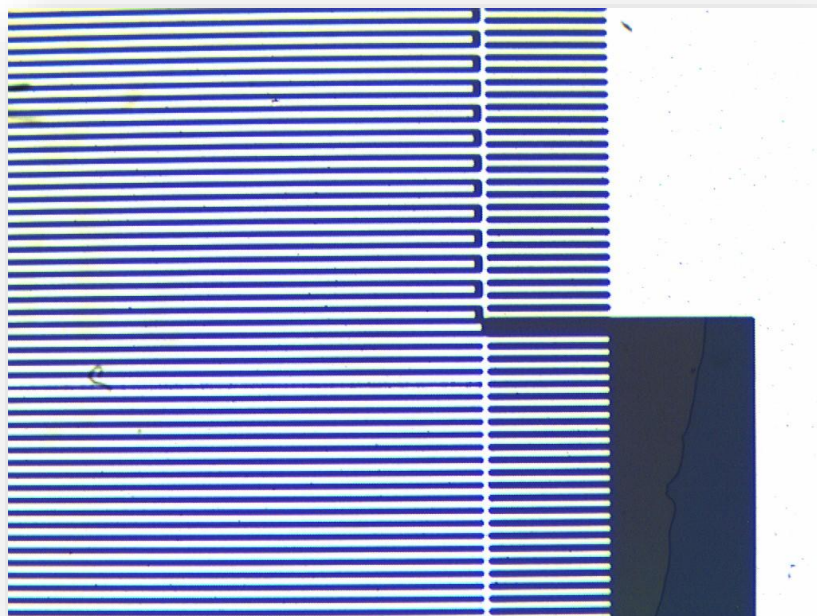
Фигура 3.15 Измерен честотен отклик на Лембов резонатор с горен насрежно гребеновиден преобразувател

Резонатора с редица от преобразуватели на надлъжна акустична вълна (фигура 3.20) е с по сложен честотен отклик, при който резонансите възникват в забранената зона на отражателите и се позиционират в зависимост от синхронизацията посредством дължината S на резонансната област между отражателите. Качествения фактор при тези резонатори достига до 2580, при значително по-голям фактор на електромеханичната връзка.

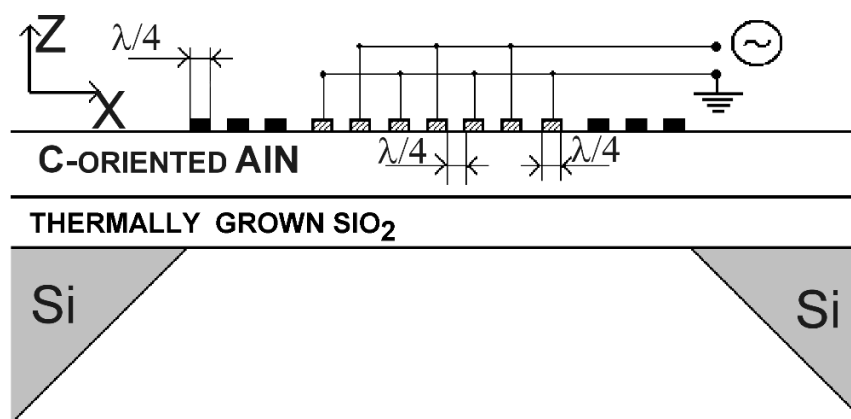
Разработена беше нова топология на насрежно-гребеновидния преобразувател с двойна електрична шина. На фигура 3.46 тази конфигурация е показана на микроскопска снимка така като е прототипирана. Втората електрична шина е широка едва няколко микрона и е формирана в околност на краищата на преобразувателя. При този дизайн е постигнато ефективно потискане на нежеланите напречно разпространяващи се паразитни вълни.



Фигура 3.20 Честотен отклик на тънкослоен резонатор на S0 вълна на Лемб с периодична редица от преобразуватели на надлъжна акустична вълна

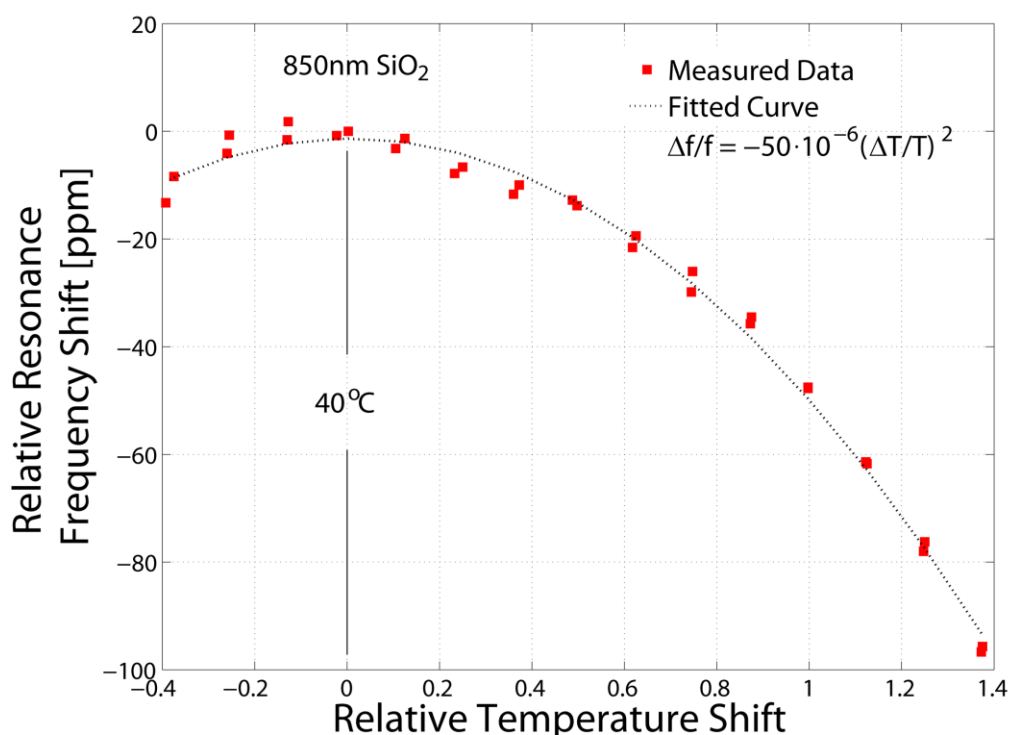


Фигура 3.46 Изглед от горе на прототипиран Лембов резонатор с двойна електрична шина



Фигура 3.51 Топология и температурно компенсирани резонатори на вълни на Лемб

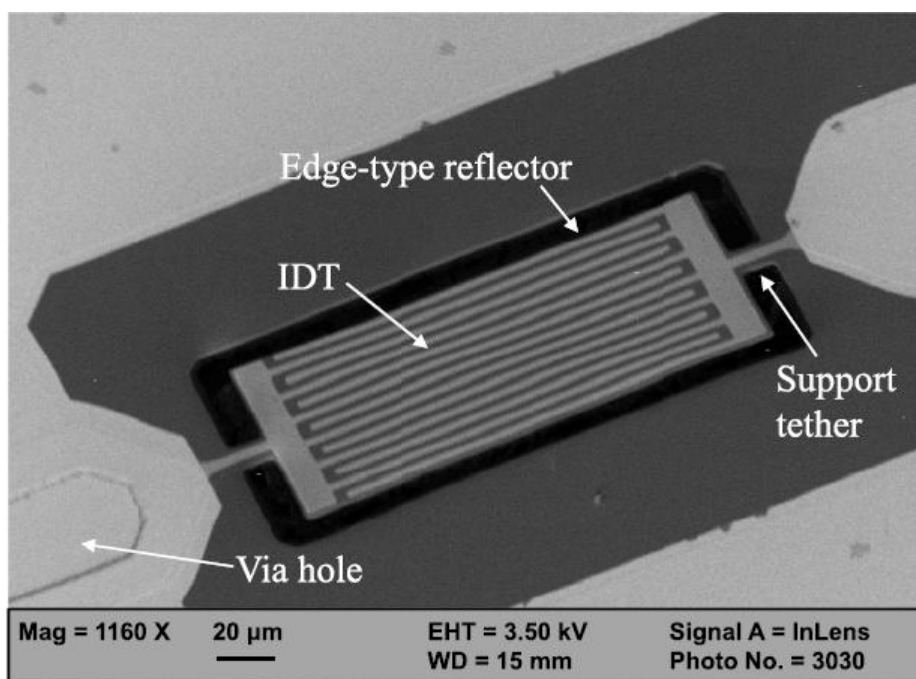
Дизайна на тънкослойни резонатори на S0 вълни на Лемб беше разширен към устройства с компенсирани температурни коефициенти на резонансната честота. Обикновено, без такава компенсация резонансът проявява чувствителност от около -23 ppm/K. Постигнато беше температурно компенсирание в специфично проектирана AlN/SiO₂ композитна мембрана (виж фигура 3.51). Прототипираните резонатори демонстрираха нулев температурен коефициент от първи порядък и коефициент от втори порядък $\beta = -31 \text{ ppb/K}^2$ около температура от 40°C (фигура 3.64). Тази стойност е съизмерима със стойностите за температурно компенсирани повърхнинни акустични вълни в ST срез на Кварц.



Фигура 3.64 Вариация на резонансната честота в температурния 25°C –95°C.

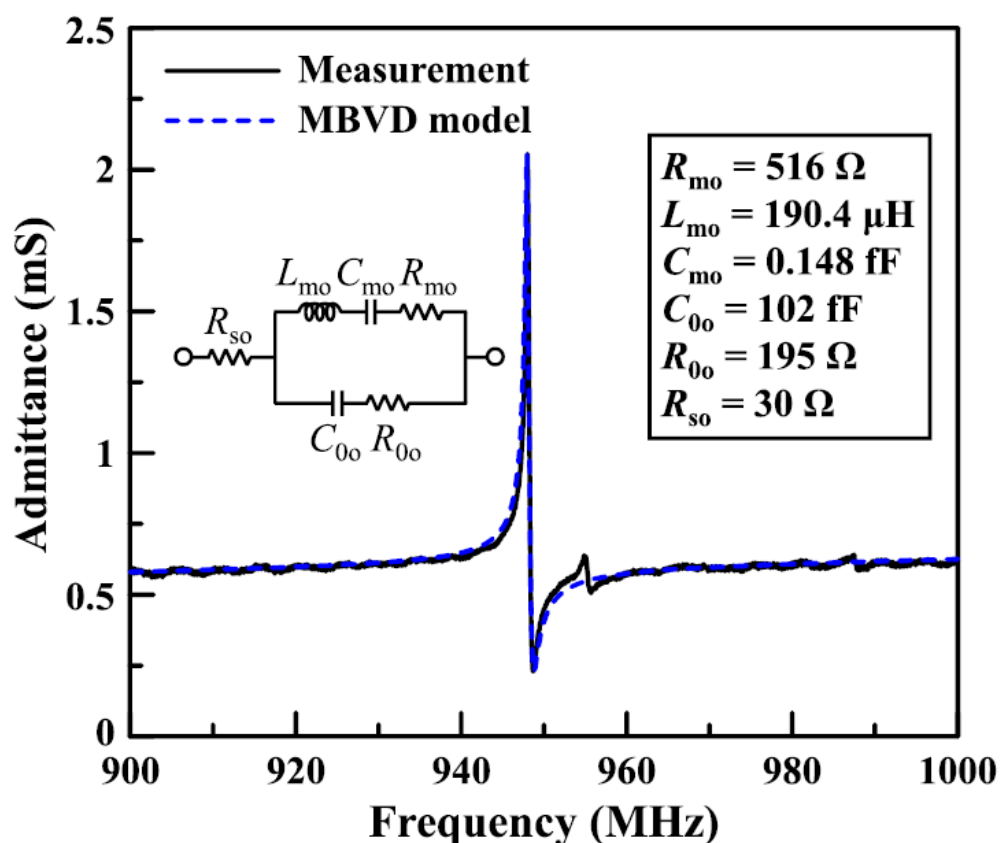
Специфично бяха разработени тънкослойни резонатори с конзолно закрепване на мембраната, при което вълновите отражатели са от

фиксиран тип, използвайки свободно стоящите краища на мембраната. Технологията на този тип устройства изисква прецизно ецване на мембраната от AlN с възможност за постигане на гладки и вертикални ръбове на свободно стоящите краища. За целта бе направен специфичен избор на електродния материал, който в този случай е Pt, за разлика от напълно закрепените резонатори където се използва Al. На фигура 3.67 е показана микроскопска снимка на прототипиран тънкослоен резонатор с конзолно закрепена мембрана, като са посочени местата на закрепване и отражателните страни на устройството. Устройството е с насрещно гребеновиден преобразувател, като в някои конфигурации има и долен непрекъснат електрод който може да бъде електрически свободен или замесен.



Фигура 3.67 Снимка от електронен микроскоп на конзолно закрепен Лембов резонатор.

На фигура 3.70 е показана измерената работна характеристика на един такъв резонатор в близост до резонанса. Резонатор е характеризиран посредством модифицираната еквивалентна схема на Butterworth-Van Dyke (MBVD). Качествения фактор на устройството достига 3000 което е в съизмеримо с резултатите получени при устройства с напълно закрепени мембрани. Коефициент на електромеханична връзка на резонатора, обаче значително по-малък поради малкия размер на преобразувателя. Използването на Pt електроди води до малко по-голям температурен коефициент на честотата от около -26 ppm/K.

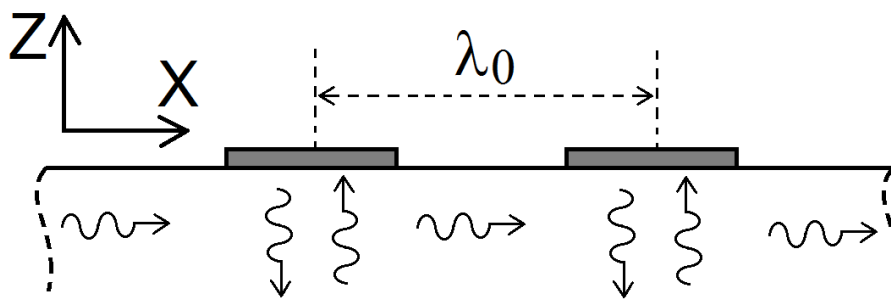


Фигура 3.70 Честотен отклик на конзолно закрепен Лембов резонатор с електрически отворена долна повърхност и горен преобразувател.

3.3 Тънкослоен резонатор на свързани S0 - A1 акустични вълни на Лемб [96]

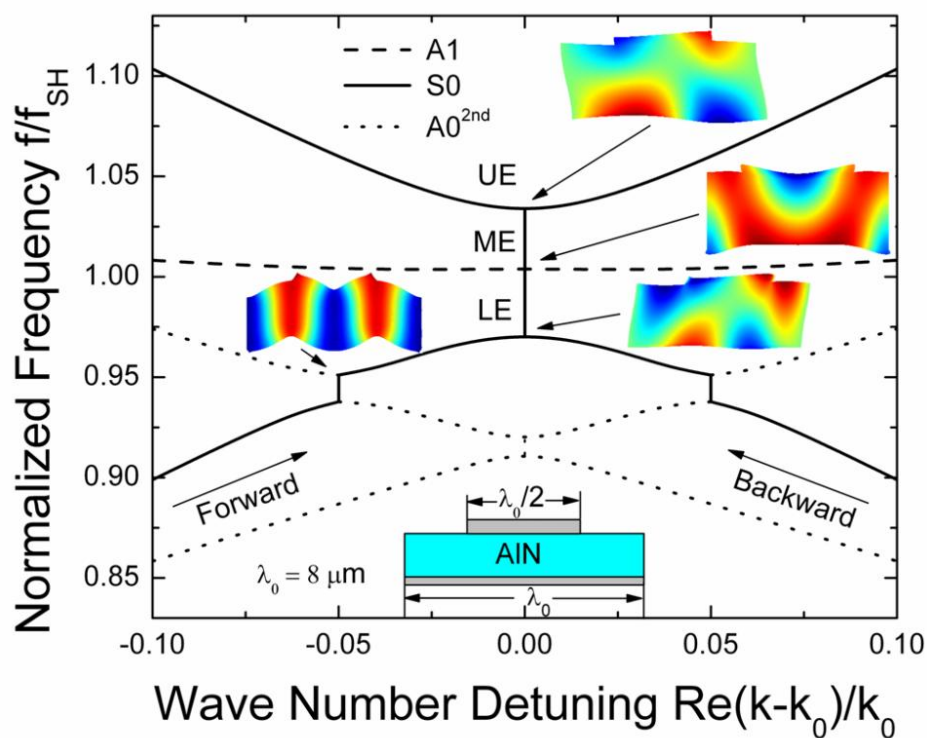
Тази част представя една изцяло нова концепция за реализирането на акустични резонансни устройства. Използвана е концепция на свързване на два различни пластинчати вълни посредством пертурбиращия ефект на електродната решетка. В случая Лембовата S0 вълна взаимодейства с Лембовата A1 вълна на неговата критична честота, като по този начин S0 вълната прехвърля енергия за съхранение във фундаменталния резонанс на напречната акустична вълна в пластината. За целта е необходимо периода на електродната решетка да е равен на дължината на S0 вълната при честота приблизително равна на честотата на фундаменталния резонанс на напречната обемна акустична вълна в пластината. Това взаимодействие е илюстрирано на фигура 3.73. По детайлна картина на взаимодействието се постига посредством анализ на собствените честоти на структурата чрез метода на крайните елементи. На фигура 3.76 е представена дисперсията на вълновото число в структура с S0-A1 вътрешно-вълново взаимодействие. Идентифицирана е специфична забранена зона с център съвпадащ с критичната честота на A1 Лембовата вълна, чиято ширина определя интензивността на взаимодействието. Подобно на забранените зони на отражателните

електродни решетки, така и тук колкото е по широка забранената зона толкова по малко електрода са необходими за ефективното залавяне на енергията. За разлика от конвенционалните забранени зони, при тази, резонанса възниква в центъра на забранената зона, докато горния и долния ръб на зоната остават слабо пиезоелектрично свързани.



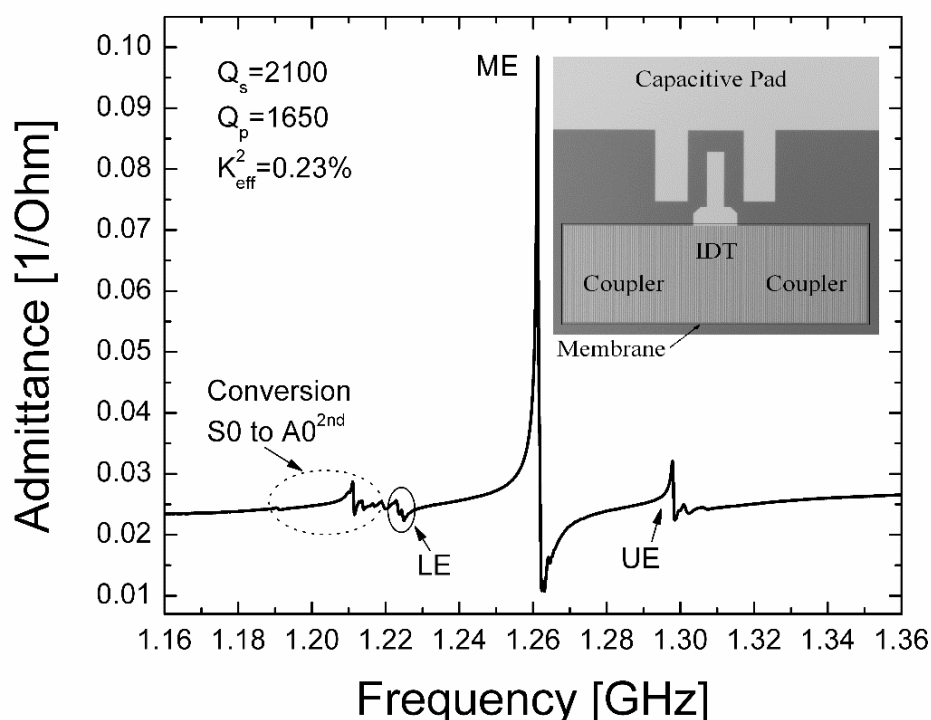
Фигура 3.73 Схемa на вътрешно-вълнов рефрактор

Наблюдава се и малка забранена зона при по ниски честоти, която възниква в резултат на взаимодействието между S0 Лембовата вълна и втория хармоник на антисиметричната Лембова вълна от най-нисък порядък A0. Това взаимодействие не залавя ефективно енергията поради тясната си забранена зона. То възниква далеч от основното и остава със слаба пиезоелектрична връзка.



Фигура 3.76 Дисперсионни характеристики. Честотата на фундаменталния резонанс на напречната вълна $f_{SH}=1.291\text{GHz}$ е получена чрез отделен анализ.

Изследваната периодична клетка, показана на фигура 3.76 е всъщност част от преобразувател на надлъжна акустична вълна в пластината. Така електродната решетка от периодично повтарящи се клетки представлява излъчвател на S0 вълна състоящ се от редица от периодично наредени надлъжни преобразуватели с период λ_0 . Този факт благоприятства проектирането на резонатор на базата на S0-A1 вътрешно-вълново взаимодействие, в който излъчвателя е и рефрактор на акустичната вълна, като в допълнение могат да се поставят пасивни рефрактори от двете страни на излъчвателя, които да подпомагат залавянето на енергията. Такъв резонатор беше проектиран, прототипиран и характеризиран на базата на напълно закрепена AlN мембрана и Al електроди. На фигура 3.78 е показан измерения честотен отклик на такъв синхронен тънкослоен резонатор заедно с микроскопска снимка на устройството.



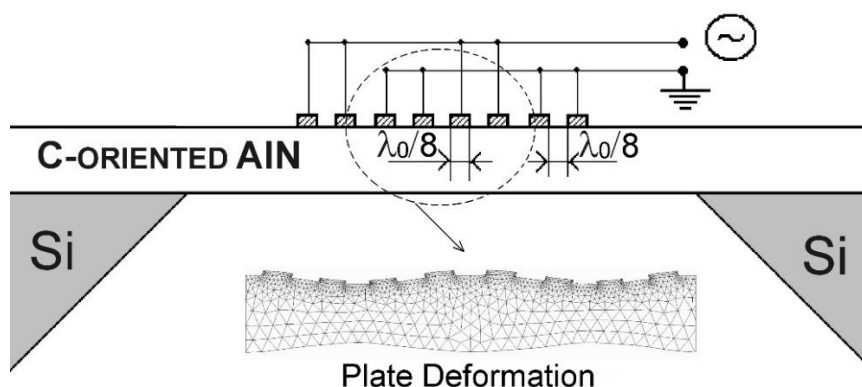
Фигура 3.78. Измерен честотен отклик в околност на резонанса на вътрешно-вълново свързан тънкослоен резонатор на Лембови вълни S0-A1

Измереното устройство има централен преобразувател и два относително дълги рефрактора от двете страни. Връзката към долния електрод е капацитивна посредством сравнително голямо припокриване на металната шина на преобразувателя с долния непрекъснат електрод. Този дизайн е специфично подбран с оглед улесняване на прототипирането и е с цел да демонстрира ефекта на енергийно залавяне посредством постигнатия резонанс с качествен

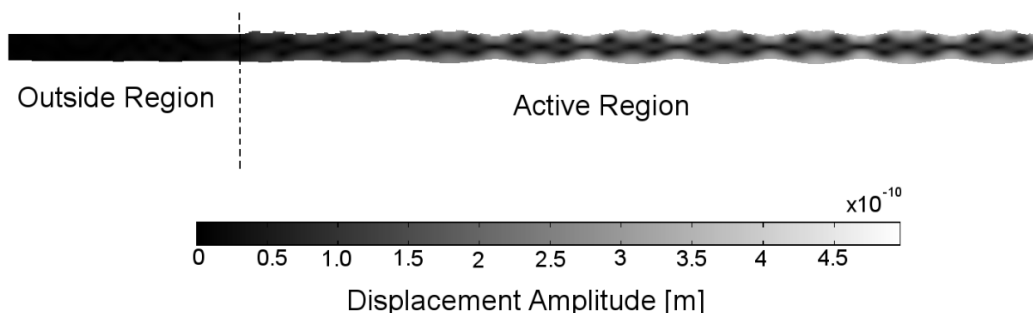
фактор на резонанс от 2100, който е сравним със S0 резонаторите с долен електрод и разпределени отражатели.

3.4 Тънкослоен резонатор на S1 акустична вълна на Лемб с нулева групова скорост

Тази част представя принципно ново резонансно устройство което не се нуждае от допълнителни отражателни елементи за залавяне на енергията. В случая се използва нулевата групова скорост характерна за S1 Лембовата вълна при определено съотношение между дължината на вълната и дебелината на пластината. За демонстрирането на такъв резонатор е използван насрещно-гребеновиден преобразувател с разцепени електроди, който се характеризира с липса на вътрешно отражение на вълните. Такъв преобразувател използва електроди с широчина $\lambda/8$. На фигура 3.80 е илюстриран резонатора с нулева групова скорост на S1 Лембовата вълна. Анализът на честотния отклик посредством метода на крайните елементи показва ефекта на залавяне на вълната под преобразувателя (фигура 3.82), което е свързано с възникване на резонанс на честотата на синхронизъм.



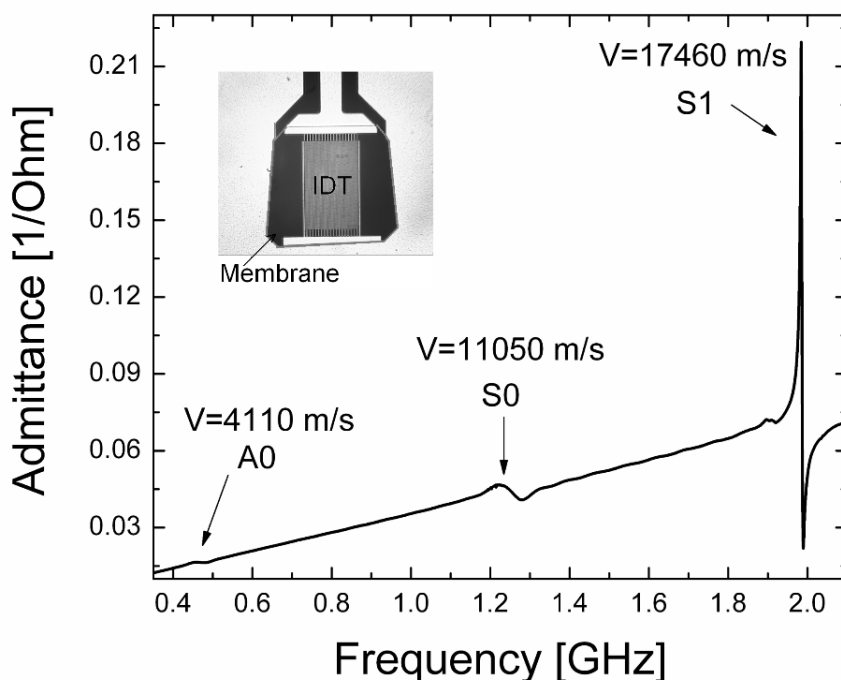
Фигура 3.80. Топология на S1 Лембов резонатор на нулева групова скорост в пиезоелектрична мембрана от AlN



Фигура 3.82. Залавяне на енергията под преобразувателя при резонанс

Такова устройство беше проектирано, прототипирано и характеризирано на базата на напълно закрепена AlN мембрана с Al електроди. Измерванията в широк честотен диапазон (фигура 3.83) показват липсата на резонансен отклик при Лембовите вълни от най

нисък порядък A_0 и S_0 , докато S_1 вълната е с резонансен отклик в пълно съответствие с теоретичните модели. Фазовата скорост на S_1 вълната на резонансната честота от около 2 GHz доближава 17500 m/s, при качествен фактор от около 600 и коефициент на електромеханичната връзка 0.65%.



Фигура 3.83. Честотен отклик измерен в широк честотен диапазон

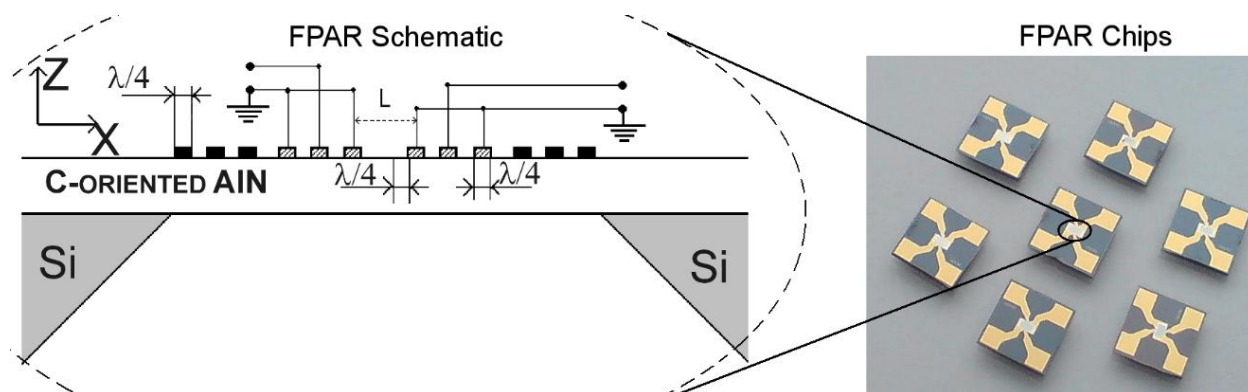
Допълнителни теоретични изследвания предсказаха подобрене в залавянето на енергията, чрез използване на малък брой допълнителни неотражателни електроди електрически свързани към маса. Тези електроди са нужни за да намалят крайните ефекти на преобразувателя, свързани с конвертиране на вълната към разпространяващи се вълни извън преобразувателя.

ГЛАВА 4. S_0 РЕЗОНАНСНИ СТРУКТУРИ С ПРИЛОЖЕНИЯ В ЧЕСТОТНИЯ КОНТРОЛ И РАДИО-ЧЕСТОТНИ ДАТЧИЦИ

4.1 Честотен генератор с резонатор на S_0 вълни на Лемб

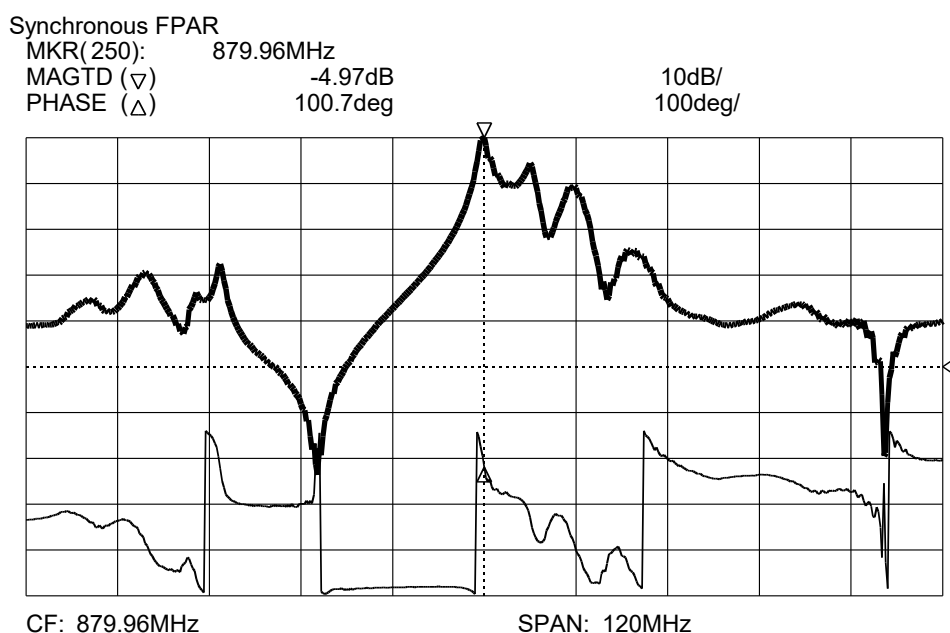
Първоначално, тънкослойните резонатори на S_0 вълни на Лемб бяха изследвани като честотно стабилизиращи компоненти във веригата на честотен генератор. Проектирани и прототипирани бяха дискретни чипове с двувходов резонатор на базата на пиезоелектричен AlN, както е показано на фигура 4.2. На фигура 4.3 е показана измерена, типичната честотна характеристика на тези чипове. Резонаторите се характеризират с резонанс в S_{21} характеристиката, който възниква при около 880 MHz, с внесени загуби от около 5dB и натоварен качествен

фактор $Q_L=720$. Избраната двувходова конструкция позволява включването на резонатора във верига с положителна обратна връзка спрямо широколентов усилвател UTO-1023 способен да генерира 0.5W изходна мощност при около 1GHz работна честота. Схемата на честотния генератор е илюстрирана на фигура 4.5 и съдържа 3dB разклонител на мощност, който позволява отвеждането на част от сигнала към спектрален анализатор. Освен с високата си мощност, използвания тук усилвател се характеризира с изключителен нисък 1/f шум от -140 dBc/Hz при 1 Hz отстояние от носещата честота [124].

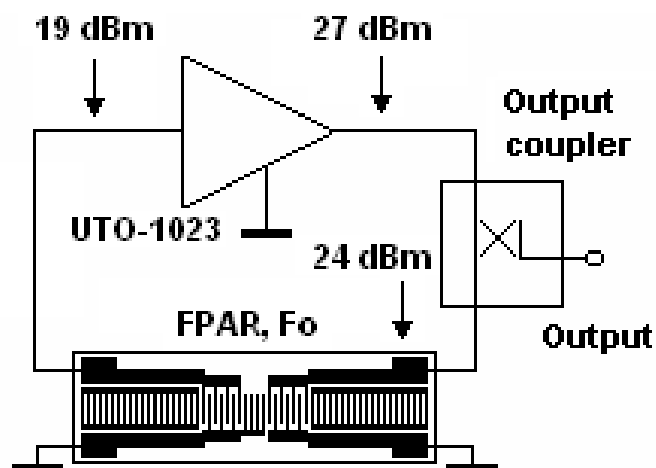


Фигура 4.2 Схема на двувходов резонатор на S0 вълна на Лемб прототипиран в чипове. FPAR е абривиатурата първоначално използвана за тези устройства.

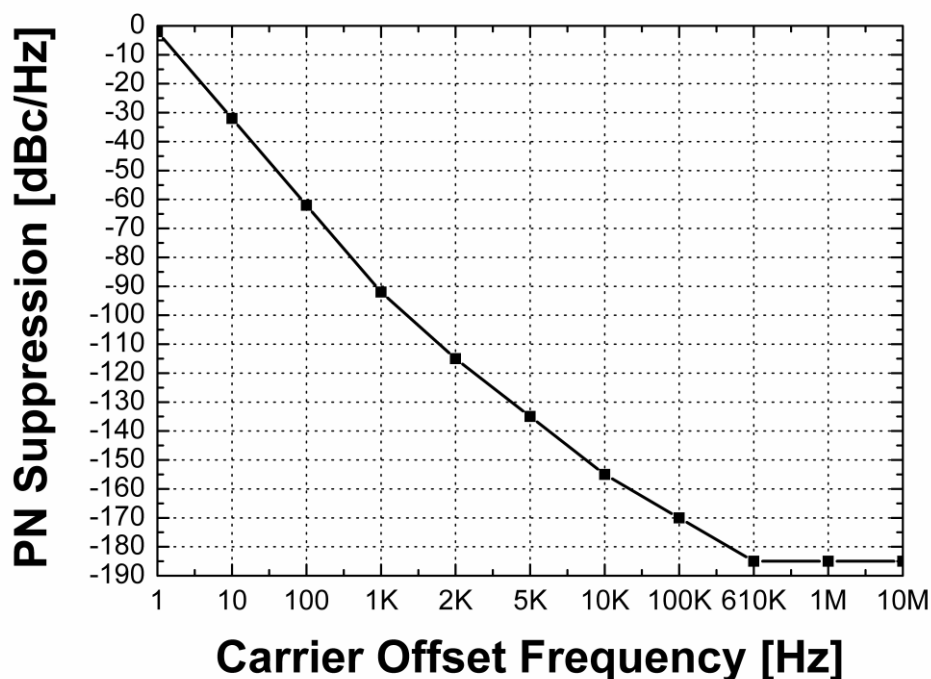
В този експеримент, тънкослойния резонатор на S0 Лембова вълна бе натоварен с входна мощност 24 dBm (250 mW) на резонансната си честота от 880MHz в продължение на 5 дни. Не се наблюдаваха никакви отклонения и деградация на работните характеристики на резонатора, което е демонстрация за възможността за работа при високи мощности на проектирания двувходов тънкослоен резонатор.



Фигура 4.3 Амплитуден и фазов честотен отклик на 880 MHz резонатор на S0 вълни на Лемб



Фигура 4.5 Диаграма на честотен генератор стабилизирен с двувходов резонатор на S0 вълни на Лемб



Фигура 4.8 Оценка на фазовия шум на честотен генератор стабилизирен с резонатор на S0 вълни на Лемб както е показан на фигура 4.5

Въпреки относително ниския натоварен качествен фактор на резонатора, генератора илюстриран на фигура 4.5 показва забележително ниски шумове на сигнала измерен в режим сигнал отнесен към шум на сигналния анализатор. Това измерване, позволява снемането на данни за шума от измерената характеристика, давайки добра представа за фазовия шум като цяло, отчитайки наклона от 30dB/декада на шума в близост до носещата честота. Базовия термичен шум се изчислява като:

$$TNF = -174 - P_0 + NF + G, \quad 4.1$$

където $P_0 = 27 \text{ dBm}$ е мощността в схемата (фигура 4.5), $G = 8 \text{ dB}$ е общата загуба в схемата, която включва внесените загуби в резонатора и 3dB отклонена мощност към изхода, $NF = 7\text{dB}$ е шумовата константа на усилвателя. Резултатите от тази оценка са показани на фигура 4.8, отличавайки -2 dBc/Hz потискане на фазовия шум при 1 Hz отстояние от носещата честота и -186 dBc/Hz базов термичен шум. На базата на тези данни може да се пресметне шумовата константа на тънкослойния резонатор α_R съгласно формулата [125]:

$$\mathfrak{I}(1\text{Hz}) = 10 \log\{0.5[\alpha_R F_0^4 + \alpha_E (F_0/4Q_L^2)]\} = -2\text{dBc/Hz}, \quad 4.2$$

където $\mathfrak{I}(1\text{Hz}) = -2\text{dBc/Hz}$ е шума при 1Hz отстояние от носещата честота F_0 , $\alpha_E = 2.2 \times 10^{-14} \text{ Hz}$ е шумовата константа на усилвателя UTO-1023 [124]. Така е изчислената шумова константа на резонатора $\alpha_R = 2.1 \times 10^{-36}/\text{Hz}$ [122], е сравнима с шумовите константи на най-добрите микроакустични резонатори на повърхнинни акустични вълни в този честотен диапазон [125], което ясно демонстрира потенциала на тънкослойната резонансна технология на S_0 вълни на Лемб като част от интегрални честотни генератори с нисък шум. Сравнението на тези резултати с независими изследвания по темата е представено на Таблица 4.1. Най-добрите резултати от различните изследвания са сравнително близки, което показва систематична връзка между използването на този тип тънкослоен резонатор и ниския шум на сигнала.

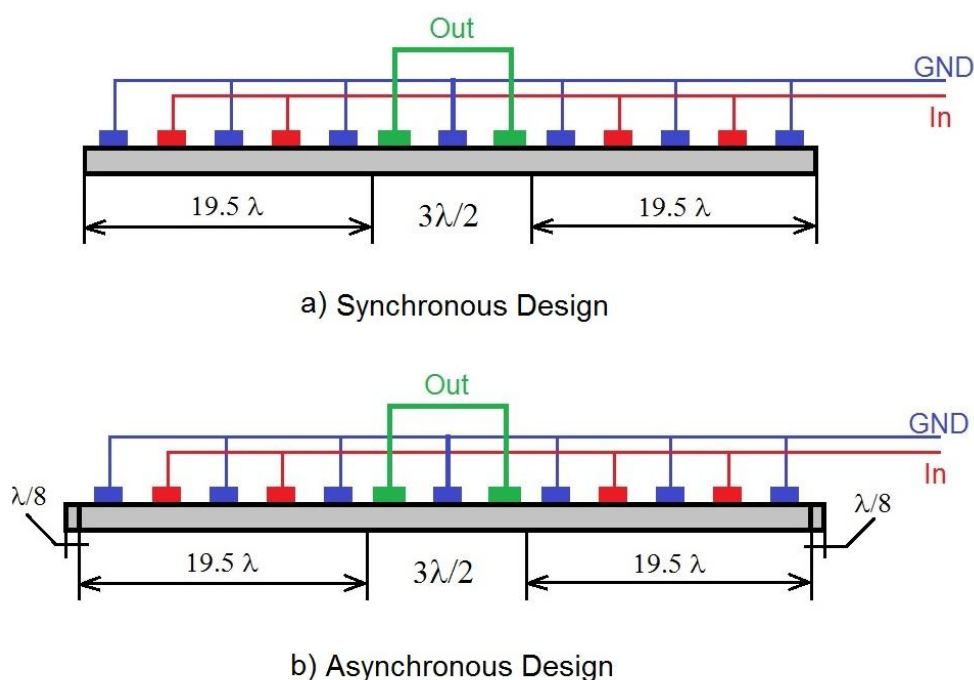
S_0 Резонансни Структури	Работна честота	Шум [dBc/Hz]
Edge type (CMR)	222 MHz	-88 [127]
Edge type (CMR)	483 MHz	-88 [128]
Edge type (CMR)	583 MHz	-93 [129]
Edge type (CMR)	1.05 GHz	-81 [101]
Grating type	880 MHz	-92 [121]

Таблица 4.1 Фазов шум на 1kHz честотно отместване от носещата честота

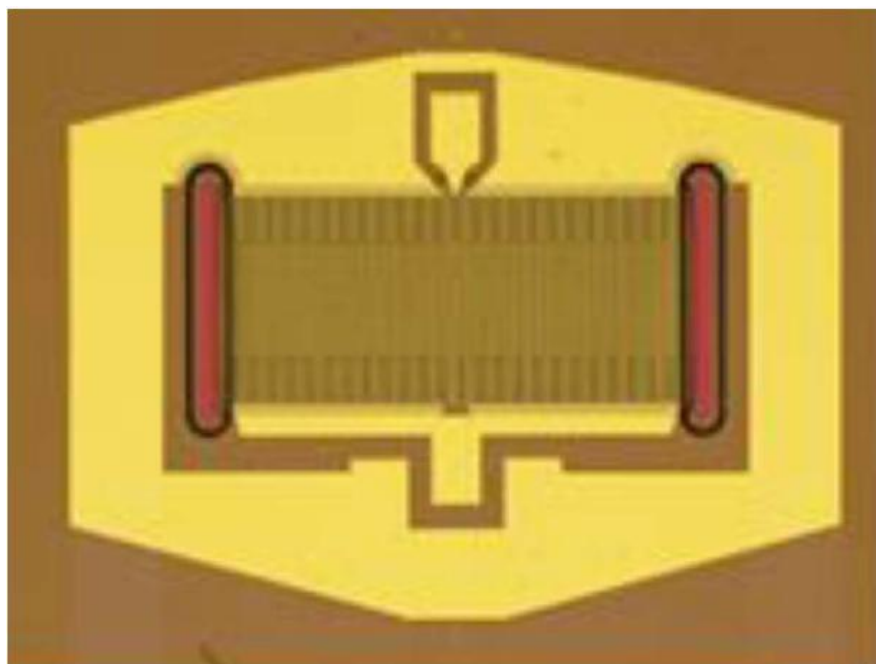
4.2 Радиочестотен трансформатор на напрежение

Беше изобретен (WO/2012/156818A3) радиочестотен трансформатор на напрежението на базата на тънкослойните резонатори на S_0 Лембова акустична вълна. Устройството беше проектирано в съответствие с разработените теоретични модели, като поради пониската честота (423MHz) беше предпочетен дизайн с фиксирани отражатели. Успешно беше използвана топологията с двойна

електрична шина за потискане на нежеланите напречни вълни в структурата.



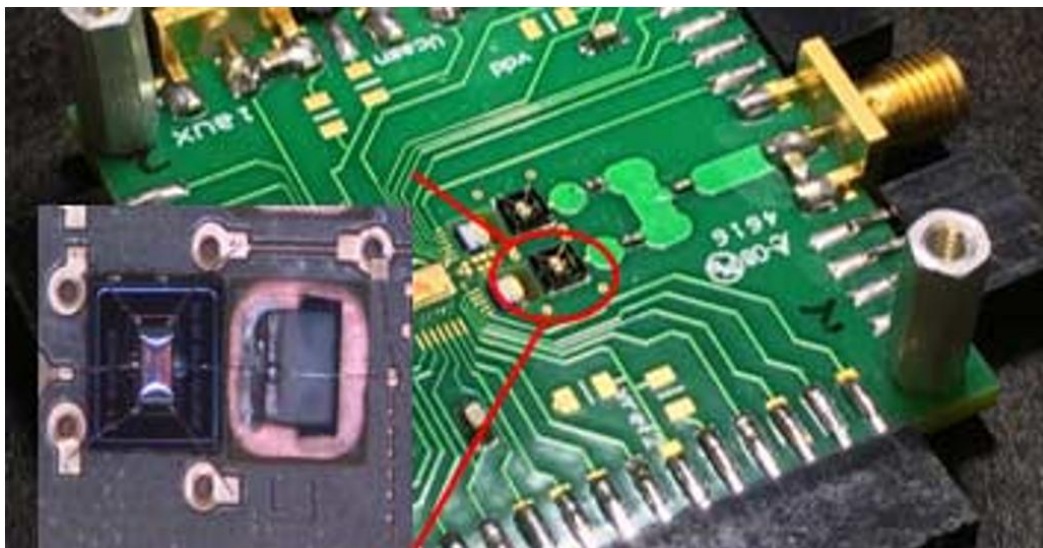
Фигура 4.10 Дизайн на радиочестотен трансформатор на S0 вълни на Лемб. а) със синхронна резонансна област (S) б) с асинхронна (AS) резонансна област



Фигура 4.15. Микроскопска снимка на прототипиран трансформатор с 38 чифта електроди в преобразувателя. Фиксираните отражатели са ецвани в краищата посредством реактивно йонно ецване.

На фигура 4.10 са скицирани двата основни дизайна на радиочестотен трансформатор. Устройството представлява двувходов тънкослоен резонатор с вход който е съгласуван към 50 Ohm и с високоимпедансен изход. На резонансна честота, енергията в резонатора е концентрирана към изхода на устройството, което подпомага

ефективната трансформация на напрежението, наред с отношението между входния и изходен импеданси. Разликата между двата дизайна на трансформатор е в синхронизма на резонансната област. За разлика от синхронния дизайн, при асинхронния резонансната област е с отместена дължина $L=n\lambda/2+\lambda/4$. Асинхронния дизайн показва по високи не натоварени коефициенти на трансформация, но също така са и по-чувствителни към влиянията на външните импеданси. Така при външен импеданс $10k\Omega$ двата типа трансформатори показват сходни натоварени коефициенти на трансформиране на напрежението.



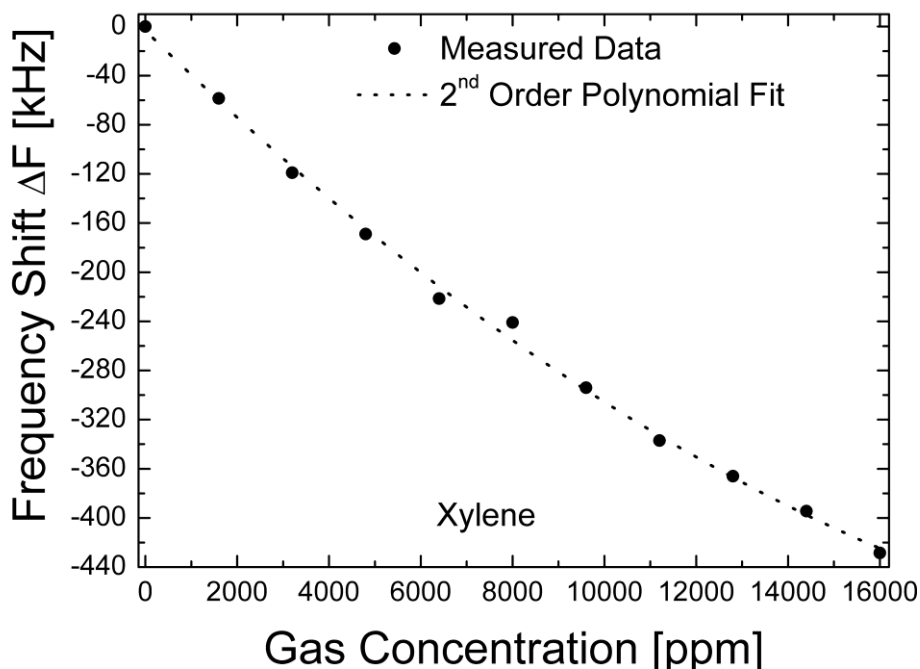
Фигура 4.18 Радио честотен приемник с два трансформатора, закъсващи индуктори и интегрална схема работеща при ниски мощности на сигнала.

На фигура 4.15 е показана микроскопска снимка на тънкослоен трансформатор така както е прототипиран. Измерването посредством векторен мрежов анализатор показва максимален коефициент на трансформация на напрежението от $G_{21}=22V/V$ в не-натоварен режим при отражение на входа под $-11dB$. При допълнително импедансно натоварване коефициента на трансформация може да падне под $10V/V$. Така прототипирания трансформатор бе вграден в радиочестотна система (виж. фигура 4.18), която може да отчете сигнал под $-60dBm$ при консумирана мощност от $10nW$.

4.3 Гравиметрични резонансни сензори

Ниските шумове на резонатора са предпоставка за постигане на висока резолюция в датчици базирани на тънкослойните S_0 резонатори на Лембови акустични вълни. За целта е необходимо демонстрирането на относително високи чувствителности на резонаторите към съответните външни влияния. Бяха направени теоретични и експериментални проучвания на масо-чувствителността на тънкослойни резонатори на S_0 Лембови акустични вълни на базата на пиезоелектричен AlN . Тези резонатори бяха експериментално изследвани при детекция на

газ Xylene. Аналитичните резултати показаха необходимост от използването на акустично тънки чувствителни слоеве в този тип резонатори, с оглед запазването на шумовите характеристики на устройствата и ниските загуби в тях, като едновременно се демонстрира висока масочувствителност.



Фигура 4.30 Чувствителност към газ Xylene на двувходов двувходов S0 резонатор покрит с 380 nm дебел HMDSO (Hexamethyldisiloxane)

Чувствителността към адсорбиран газ беше измерена и сравнена със конвенционални газови сензори на повърхнинни и напречни приповърхнинни акустични вълни. В [144] е извършено сравнение на покрити с HMDSO резонатори на напречни приповърхнинни вълни при честота 700MHz и на повърхнинните акустични вълни на Rayleigh при честота 430MHz. Двата типа резонатори са тествани за тяхната чувствителност по отношение на различни химически газове сред които и Xylene. В това изследване се постига оптимизиране на дебелините на HMDSO слоевете с оглед постигането на максимална чувствителност на сензорите. При оптимална дебелина на чувствителния слой, енергията се локализира на повърхността слоя и обуславя високата чувствителност на устройствата към адсорбираните газове [144]. Установени са оптимални дебелини на HMDSO от 100nm за резонатора на приповърхнинни акустични вълни и 280nm за резонатора на повърхнинни акустични вълни на Rayleigh. Измерени са чувствителности към газ Xylene, съответно 6.4Hz/ppm и 3.1Hz/ppm. Изведено е заключението, че приповърхнинната акустична вълна е по чувствителна при идентична дължина на вълната в сравнение с повърхнинната акустична вълна на Rayleigh. Това сравнение беше допълнено,

използвайки същата методология, с експериментално изследване на двувходов тънкослоен резонатор на S0 вълни на Лемб, покрит с 380nm дебел слой HMDSO. На фигура 4.30 е показана измерената чувствителност на тънкослойния резонатор към газ Xylene с различна концентрация. Промените на резонансната честота и внесените загуби са измерени посредством векторен мрежов анализатор. Всички данни са получени от един резонатор с последователно увеличаване на концентрацията на Xylene в експеримент при който отклика на устройството е напълно обратим. Кривата на чувствителността е приблизително линейна с наклон от -31 Hz/ppm, което дефинира около 5 пъти по висока чувствителност от чувствителността на резонатор на приповърхнинни акустични вълни [144], работещ на близка честота. Едновременно с това, внесените загуби в тънкослойния резонатор варираха в рамките на 1 dB в целия диапазон на измервани концентрации.

Акустична вълна	Честота	Чувствителност
Повърхнинна/Кварц	430 [MHz]	-7.2 [Hz/ppm] [144]
Приповърхнинна/Кварц	700 [MHz]	-9.1 [Hz/ppm] [144]
S0 вълна на Лемб / AlN	890 [MHz]	-31 [Hz/ppm] [133]

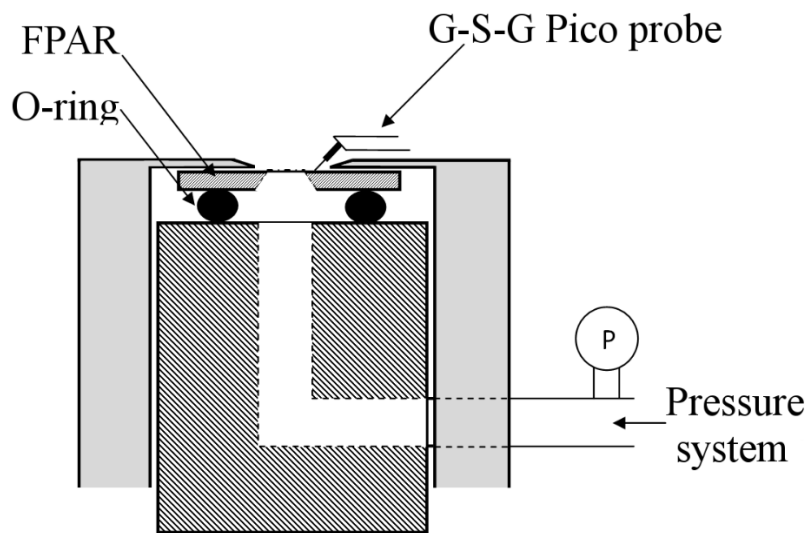
Таблица 4.4 Чувствителност към газ Xylene на двувходови S0 резонатори покрити с HMDSO

В таблица 4.4 са резюмирани масовите чувствителности на трите типа резонатори към газ xylene. По точното сравнение изисква нормализиране на чувствителностите към номиналната честота на устройствата. Получените нормализирани чувствителности се съотнасят както 5.0:1.3:1.0, съответно за тънкослойния резонатор, за резонаторна на приповърхнинни вълни и за резонатора на повърхнинни вълни на Rayleigh, което е в добро съответствие с представените теоретични модели. В заключение, тънкослойните резонатори на S0 вълна на Лемб в мембрана от пиезоелектричен AlN могат да достигнат резолюция по висока от тази на конвенционалните резонатори на повърхнинни и приповърхнинни акустични вълни върху Кварц. Проектирането на газови сензори с висока резолюция изисква оптимално отношение между увеличената масо-чувствителност и повишаване на шума в резултат на увеличаване на загубите в устройството поради добавения вискозитет на масо-чувствителния слой и адсорбирания газ.

Бяха извършени изследвания на работните характеристики на тънкослойния резонатор на S0 вълна на Лемб с повърхност потопена в течна среда. Резултатите показаха възможност на устройството да

оперира като масо-чувствителен сензор в течна среда. Използвайки, електрически екранирана долна повърхност посредством непрекъснат по повърхността електрод резонатора остава чувствителен само към механичните свойства на течността. Сравнителни измервания във водни разтвори на sucrose и ethylene glycol при сравними стойности на масовата плътност умножена по вискозитета показва относително по-голяма чувствителност на резонатора към плътността на средата и относително по-малка към нейната вискозност.

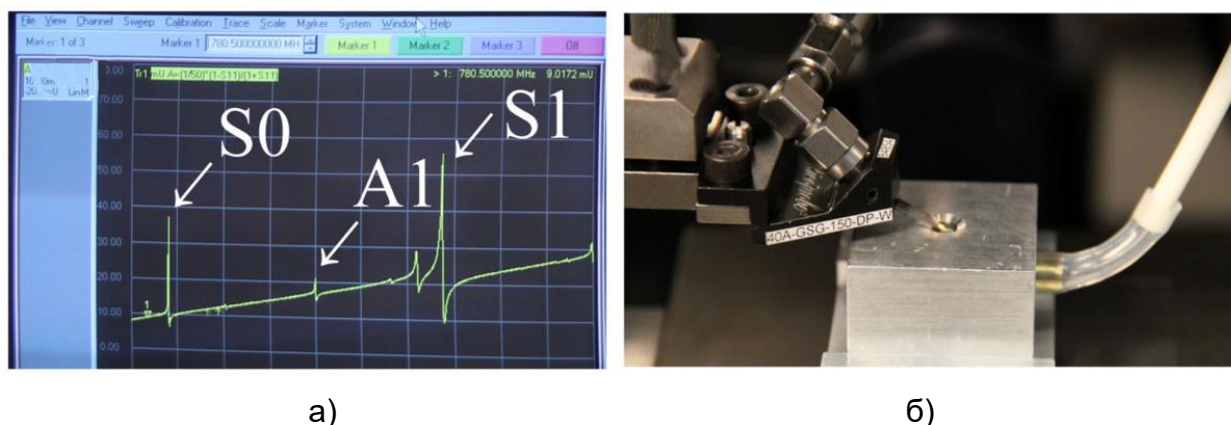
4.4 Резонансни сензори на външно налягане



Фигура 4.43 Напречно сечение на експериментална установка за измерване на чувствителност към външно налягане

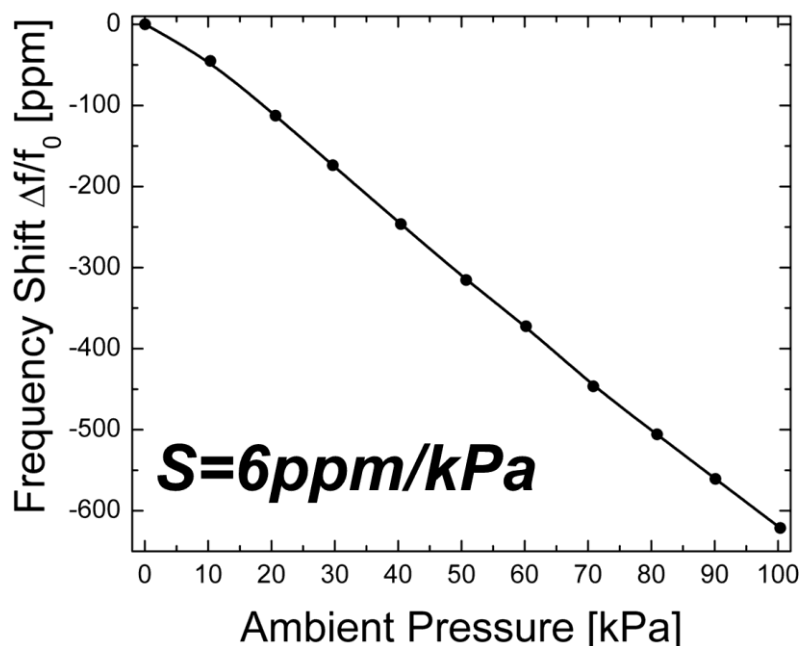
Освен масо-чувствителност, тънкослойните резонатори на акустични вълни на Лемб предполагат и висока чувствителност към външно налягане заради сравнително голямото отношение между площта на мембраната и нейната дебелина. В резултат, пиезоелектричната AlN мембрана се деформира значително под въздействието на външно налягане и се индуцира вътрешно механично напрежение, което променя еластичността на мембраната и води до отместване на резонансната честота на устройството. Направено беше сравнително теоретично и експериментално изследване на чувствителността към външно налягане на тънкослоен резонатор опериращ съответно на S_0 , A_1 и S_1 Лембови вълни в различните честотни диапазони на работната си характеристика. Беше предсказана и потвърдена по-голямата чувствителност на Лембовата S_0 вълна в сравнение с останалите Лембови вълни. Като главен механизъм беше изведен промяната на еластичността като функция на деформацията на мембраната при приложено външно налягане. В експеримента беше използван синхронен тънкослоен резонатор на Лембови вълни монтиран в специално проектирана система с възможност за измерване с радиочестотна микрометрична сонда. На фигура 4.43 е скицирана

тестовата установка съвместима с 6mm x 6mm чипове съдържащи тънкослоен резонатор на Лембови акустични вълни в пиезоелектрична мембрана от AlN.



Фигура 4.44 Експериментална установка а) векторен мрежов анализатор HP8364B б) Радиочестотна G-S-G микро-сонда и фикстура за измерване на диференциално налягане.

Чип с резонатор на Лембови акустични вълни бе монтиран посредством механично притискане към еластичен полимерен пръстен, покрит с вакуумна грес. Цифров датчик на налягане GE Duck DPI 705 бе използван за следене на налягането докато честотния отклик на резонатор беше измерен посредством HP8364B векторен мрежов анализатор. На фигура 4.44а е показан измерения честотен отклик на резонатора в който ясно се виждат резонансите на S0, A1 и S1 вълните. Малките резонансни отклици от ляво на главния S1 резонанс, също принадлежат към S1 вълната. На фигура 4.44б е показана експерименталната установка в процес на измерване. На фигура 4.51 е показано измерено изменението на резонансната честота на тънкослоен резонатор на S0 Лембова акустична вълна като функция на външното налягане до 100kPa. Демонстрирана е добра линейност на отклика с наклон от -6ppm/kPa [23]. В независими изследвания, чувствителността на този тип резонатори беше в следствие значително подоброено на базата на композитни мембрани [160]. Резонатори с по ниска чувствителност се проектират с оглед на техния по висок динамичен обхват и обратно резонатор с висока чувствителност работят при относително по ниски диференциални налягания. Измерванията по казаха, че S0 вълната на Лемб е с най голяма чувствителност по отношение на приложено външно налягане спрямо останалите вълни възбудени в структурата. Измерванията с налягания до 100kPa показват обратима линейна зависимост между резонансната честота и налягането с наклон от 6ppm/kPa [23] (виж на фигура 4.51). Съществено подобряване на чувствителността беше реализирана в последствие в резонатори върху композитни мембрани [160], като бяха достигнати нива от 1 ppm/Па при честота от около 750MHz.



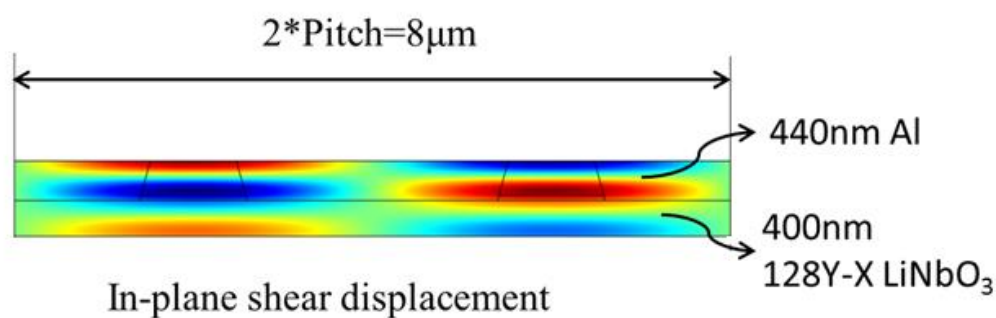
Фигура 4.51 Измерена чувствителност към външно налягане на синхронен резонатор на S0 вълна на Лемб при диференциално налягане до 100kPa

ГЛАВА 5. РЕЗОНАНСНИ СТРУКТУРИ НА A1 ЛЕМБОВИ ВЪЛНИ В СУБ-МИКРОМЕТРИЧНИ СЛОЕВЕ НА ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧЕН LiNbO_3

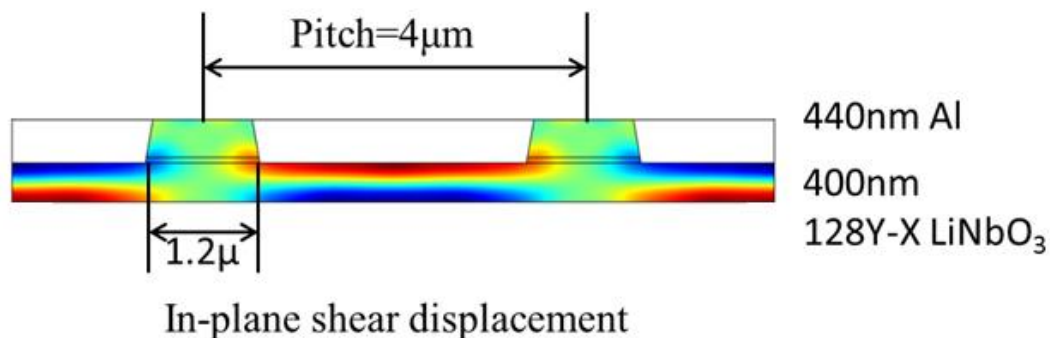
Тънкослойните резонансни структури на A1 Лембови вълни в мембрана от пиезоелектричен LiNbO_3 бяха изобретени през 2010г [24] като структури с напълно закрепени мембрани от епитаксиално нанесен слой, върху който са формирани насрежно гребеновидни преобразуватели. В продължение на последвалите 7 години се осъществи значим технологичен прогрес в трансферирането на тънки пиезоелектрични слоеве от монокристален образец посредством йонен-срез и ковалентна връзка между тънкия слой и носещата основа (обикновено от Si). Така тънкослойната технология на A1 Лембови вълни в LiNbO_3 беше преоткрита и през 2018 структурата беше подобрена и ребрандирана с абревиатурата XBAR, която остана като широко прието наименование на този тип резонатори. Именно посредством новото си наименование [189], устройството придоби силна популярност в научните среди. От тогава, вече 7 години, агресивно се публикуват най-различни публикации по темата, предимно от научни звена от Китай и САЩ. Темата се разшири към изследването на по широк кръг от Лембови вълни в LiNbO_3 като A3, S2 и други, като се изследват и композитни $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2$ платформи. Тези устройства бяха мащабирани до честоти над 10GHz. Разработени бяха нови резонансни структури с абревиатурата YBAR, опериращи на първият пластинчатата вълна с напречна поляризация на вълната. За сега тези нови предложения за устройства не изглеждат обещаващи с

оглед на скорошното им практическо приложение, но изследванията продължават и се очаква да се постигне значително подобрене в работните им характеристики в бъдеще.

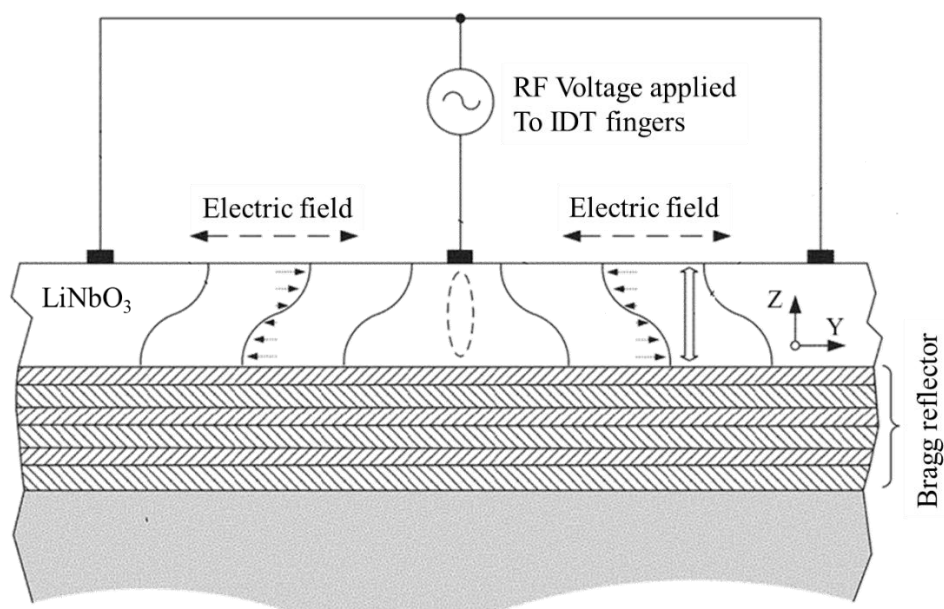
Тази посока в изследванията възникна поради необходимостта от резонатори с голям коефициент на електромеханична връзка. Имах възможност да работя около 2 години по темата в качеството си на консултант към стартиращата компания Resonant Inc. За това кратко време, ние постигнахме значителен скок и демонстрирахме първите практически значими резултати, които помогнаха за придобиването на тази технология от голям индустриален играч (Murata Manufacturing, Japan) през 2022г. В дисертацията са обобщени част от тези изследвания, които придобиха публичност но и са основополагащи за индустриализацията на технологията. Значим принос в полето са изобретените A1 резонансни структури, позволяващи работа при относително високи радиочестотни мощности. Това са структури с акустично дебели електроди в насрежно-гребеновидния преобразувател, които значително намаляват паразитните съпротивления и увеличават топлинната проводимост. В тези структури, основния проблем беше възможността да се проектират устройства с подтиснати паразитни вълни, които в случая представляваха хибридни вълни на взаимодействие на A1 Лембовата вълна с Лембовите вълни от по-нисък порядък A0, S0, както и по високи хармоници на A1 вълната. Установи се, че ширината на електродите в насрежно-гребеновидния преобразувател трябва да бъде по малка от 0.3 от периода на преобразувателя, докато дебелината им трябва да е такава, че A3 вълната в електрода и A1 вълната извън него да имат близки честоти. Това условие се свързва с осигуряването на ниски вертикални механични напрежения на интерфейса между електродите и мембраната от LiNbO_3 . Това условие е илюстрирано на фигура 5.4, където се вижда пространственото положение на екстремумите (в синьо и червено) на напречното отместване на частиците в композитна мембрана с непрекъснат дебел електрод при условието на синхронизъм между A1 и A3 вълните. На фигура 5.5 е илюстрирано пространственото разпределение на A1 вълната в структура с акустично дебели и относително тесни електроди в преобразувателя. Този тип дизайн е без аналог сред другите видове микроакустични устройства. По правило, структурите с дебел електрод се характеризират често с големи загуби и нисък коефициент на електромеханична връзка.



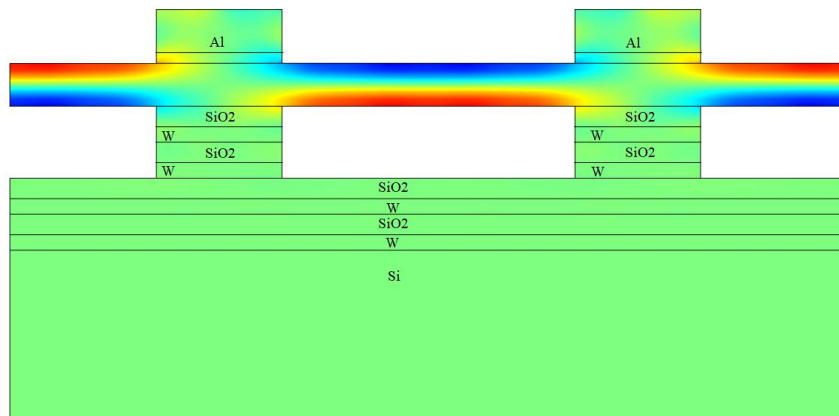
Фигура 5.4 Напречно отместване на частиците в композитна мембрана от 440nm Al/ 400nm LiNbO₃ близо до синхронизъм



Фигура 5.5 Напречно отместване на частиците в преобразувател с 440nm дебели електроди от алуминий, с коефициент на метализация $mt=0.3$ формирани върху 400nm LiNbO₃ мембрана

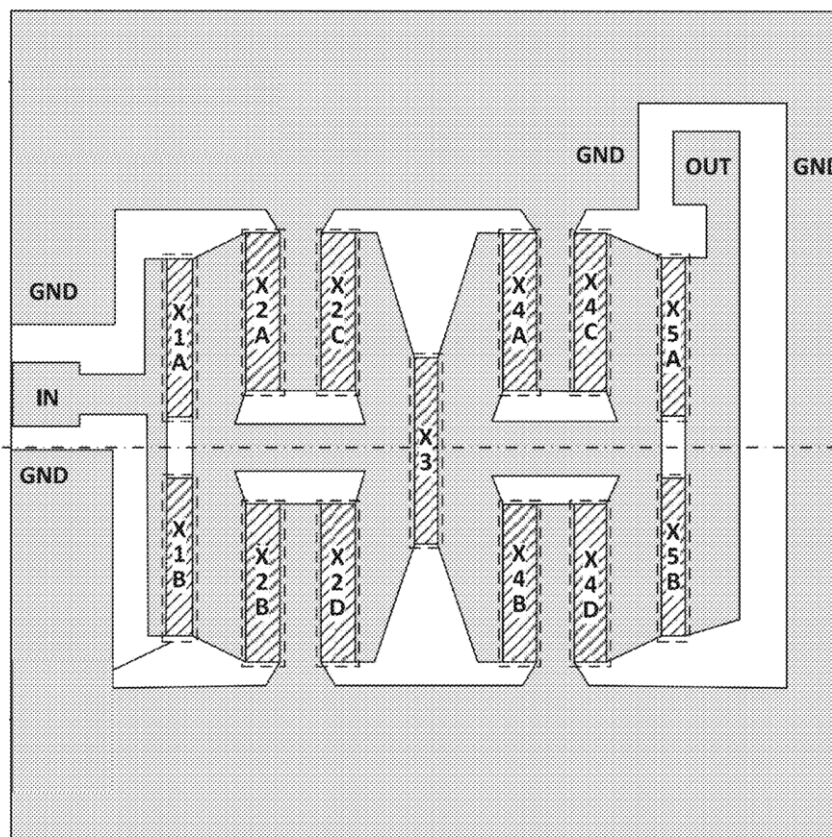


Фигура 5.23 Скица на отместването на частиците в твърдо-закрепен А1 Лембов резонатор върху отражател на Bragg [169].



Фигура 5.24 Скица на отместването на частиците в пиедестално закрепен резонатор на A1 Лембова вълна на базата на пиедестали формирани като отражатели на Брег [170]

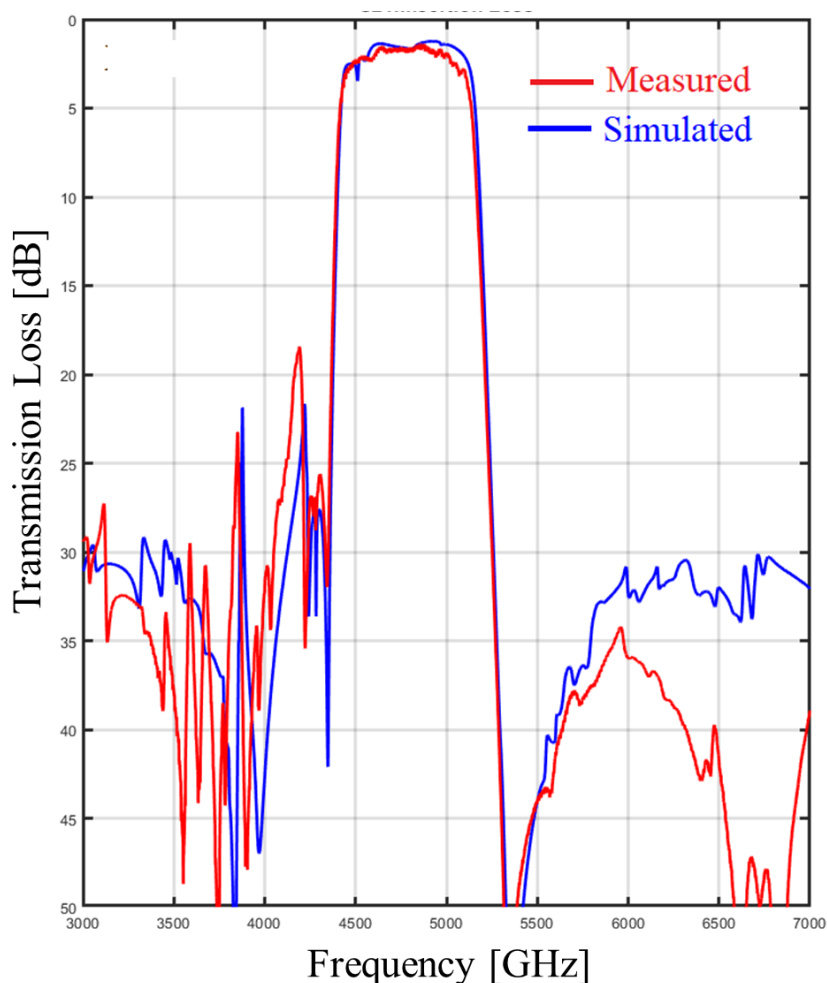
В контекста на създаването на A1 Лембови устройства с подобрена устойчивост на мощност се изобретиха устройства на базата на рефлексори на Bragg (виж фигура 5.23) и пиедестали формирани като рефлексори на Брег (виж фигура 5.24), които осигуряват ефективен път за охлаждане на структурите при работа на относително по-високи мощности.



Фигура 5.28 Симетрична схема на РЧ филтър на A1 Лембови вълни [172]

Нуждата от резонатори с изключително високи фактори на електромеханична връзка доведе до изобретяването на завъртени срезове на LiNbO_3 в околност на 120°Y-X [30], които демонстрират 30%

по-висок коефициент на електромеханична връзка спрямо номинала демонстриран от Z-Y LiNbO_3 . Резонансни структури базирани на тези изобретения бяха използвани за проектирането и прототипирането на широколентови филтри при честоти над 4GHz. За целта беше изобретена специфична конфигурация на филтрите, която използва равномерно разпределени резонатори с приблизително еднакви площи с оглед подобряването на надеждността на устройствата [172]. Схемата на филтър с разпределени резонатори е показана на фигура 5.28. По същество, това е схема с 5 резонатора от които два са закъсяващи към маса и три са последователно свързани между входа и изхода на устройството. Всеки от закъсяващите резонатори е разделен на 4 съставни резонатора с оглед постигането на мембрани с по добра механична устойчивост. По аналогия, два от серийните резонатори са разделени на два съставни резонатора, всеки. Този тип схема беше приложена в проектирането на първият филтър за честотна лента n79, който издържа до 31dBm входна мощност [29]. На фигура 5.32 е показана измерената S21 характеристика на прототипирания филтър в сравнение с получената посредством числени симулации.



Фигура 5.32 Сравнение на S21 характеристиките на измерен и симулиран n79 филтър

Проектирането посредством числени оптимизации на такъв филтър изисква интегрирането на различни аналитични инструменти. За самото оптимизиране се използва среда за анализ на радиочестотни прибори която е свързана към аналитичен инструмент базиран на метода на крайните елементи за симулация на акустичните резонатори. В допълнение, се отчитат паразитните наводки на свързващите електроди в схемата на филтъра посредством инструмент за електромагнитен анализ, който също е базиран на метода на крайните елементи.

През тези 2 години в които активно се занимавах с резонансните устройства на А1 Лембови вълни, станах автор и съавтор в множество патенти, които не са представени в тази дисертация. Много от детайлите свързани с индустриализацията на устройствата все още са конфиденциални и не могат да бъдат изложени тук. Все пак, много неща се изясняват в поканен доклад на Resonant Inc. (компания на Murata Manufacturing) на 2025 Int. IEEE Ultrasonic Symposium в Утрехт, Нидерландия [193], където също се откроява практическата стойност на симетрично структурираните резонатори представени в патент от настоящата дисертация [192].

ГЛАВА 6. КРАТКО ОПИСАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИЯТА И ПРИНОСИ

Глава 1 представлява въведение в полето с цел да дефинира контекста на изследванията представени в дисертацията. Основните микро-акустични технологии са разгледани заедно с прогреса им до денс. Три отделни резонансни технологии са изведени. Това са тънкослойната технология на обемни акустични вълни, радиочестотната технология на повърхнинни акустични вълни и тънкослойната резонансна технология на Лембови акустични вълни. Тънкослойната Лембова резонансна технология на практика се основополага чрез резултатите в тази дисертация. Трябва обаче да се отбележи, че има опити за реализиране на тънкослойни Лембови устройства през 80те години на миналия век, но тънкослойни Лембови резонатори са специфично разработени и демонстрирани за пръв път в публикация от тази дисертация. В този смисъл, като цел на дисертацията е поставена разработването на Лембовата тънкослойна резонансна технология, започвайки от нейните физични фундаменти. Изследванията включват теоретични, производствени и приложни аспекти и са проведени в продължение на 15 години. Тънкослойни Лембови резонатори базирани на AlN и LiNbO₃ тънки пиезоелектрични слоеве са демонстрирани и изследвани в дисертацията.

Глава 2 описва разработването на аналитични инструменти в подкрепа на проектирането на тънкослойни Лембови резонатори. По същество разработените модели представляват разширяване и адаптиране на

известни модели при проектирането на устройства на повърхнинни акустични вълни. В секция 2.1 е представен полев анализ на разпространението на Лембови вълни в тънки пластини с периодични електродни решетки по повърхностите. Анализът е разработен на основата на теоремата на Floquet-Bloch за разпространение на вълни в периодични структури. В секция 2.2 метода на функциите на Green е адаптиран към анализа на възбуждането на Лембови вълни посредством насрещно-гребеновидни преобразуватели и периодични редици от преобразуватели на надлъжни акустични вълни. Разработките разширяват аналитичните методи във физиката на акустичните вълни. Редица изключителни книги описват конвенционалните теории, които представляват фундамента на моделите разработени в тази дисертация. [193 -197]. С възникването на високо продуктивни машини и софтуер за анализ посредством метода на крайните елементи, фокусът на теоретичните разработки се измести към разработването на ефективни процедури и алгоритми за проектиране и анализ на резонансни структури базирани на акустични вълни на Лемб. В секция 2.3 са представени методи за бърз анализ посредством метода на крайните елементи в среда на Multiphysics COMSOL, които могат да бъдат директно сравнени с аналитичните инструменти разработени в секции 2.1 и 2.2. Въведен е анализ на дисперсията на вълновото число в равнината на дифракция на вълната. За целта са анализирани 3D периодични структури посредством метода на крайните елементи. В синхрон с резултатите от анализа представен в секции 2.1, 2.2 и 2.3, в секция 2.4 е въведен формализма на „свързаните-вълни“ за проектиране на Лембови резонатори. Той представлява феноменологична теория с няколко параметъра описващи възбуждането и разпространението на вълните в периодични среди. Изведени са методи за аналитично и експериментално получаване на тези параметри. Изведена е еквивалентна електрическа схема на Лембовите резонатори, която е съвместима с теорията на свързаните вълни. Разработените аналитични инструменти са използвани в проектирането на устройствата представени в следващите глави.

Глава 3 е посветена на проектирането, прототипирането и характеризирането на тънкослойни резонатори на Лембови акустични вълни в с-текстуриран пиезоелектричен AlN израснат върху силициева подложка (типично 4" - 6"). Секция 3.1 показва първите и основополагащи прототипи на тънкослоен S0 Лембов резонатор. Разработването на тези резонатори предхожда по време изграждането на необходимите аналитични инструменти за оптимизация на дизайна. В случая устройствата са проектирани като тестови структури за изследване на приложимостта и технологичната съвместимост на този тип резонансни структури. Тези първоначални резултати подчертаха

необходимостта от преодоляването на редица проектни и производствени слабости на технологията, като същевременно показваха потенциала на тази технология и мотивираха продължаването на изследванията в тази област. В секция 3.2 S0 Лембови резонатори със значително подобрени дизайн и технология са прототипирани и характеризирани. Демонстрирани са едновходови и двувходови резонатори с високи качествени фактори. Проектирани и прототипирани са и S0 Лембови резонатори като MEMC структури с конзолно закрепена мембрана и различни конфигурации на преобразувателя с оглед получаването на устройства с повишен коефициент на електромеханична връзка. Осъществено е оптимизиране на дизайна по отношение потискането на нежелани паразитни напречни вълни в структурата. Нов дизайн с двойна електрическа шина е въведен в проектирането на Лембови резонатори с подтиснати паразитни напречни вълни. Проектирани са и са прототипирани S0 Лембови резонатори с температурна компенсация на честотата в композитни AlN/SiO_2 мембрани. Секция 3.3 показва нов тип резонансно устройство функциониращо на основата на вълново конвертиране между S0 вълна на Лемб и A1 вълната на Лемб на нейната критична честота. Този нов принцип на резонансно устройство е теоретично описан и експериментално потвърден посредством прототипирането на пръв по рода си акустичен резонатор. Преди това изобретение, залавянето на енергия в акустични резонатори е осъществявано посредством различни видове акустични отражатели, докато в този случай вълната рефрактира и се свързва с фундаменталния резонанс на напречната акустична вълна в пластината. Накрая, един нов вид резонатор базиран на S1 Лембова вълна с нулева групова скорост е теоретично описан и експериментално демонстриран. Този тип резонатор не изисква отражатели и използва не отражателен насрещно-гребеновиден преобразувател с разцепени електроди и няколко предпазващи електрода от всяка страна на преобразувателя.

Глава 4 представя работата по изследване на приложимостта на тънкослойната технология базирана на S0 вълни на Лемб в AlN мембрани. Демонстриран е честотен генератор с нисък шум, в който Лембовия резонатор се използва като стабилизиращ елемент в схема с положителна обратна връзка. Възможността за работа при нисък шум се съчетава с много добрата гравиметрична чувствителност на устройствата и разкрива потенциал за приложения в газови химични сензори с висока резолюция. Резонаторите базирани на S0 Лембова вълна показва обещаваща ефективност при работа в течни среди. Устройствата запазват резонансната си същност и проявяват чувствителност към вискозитета и плътността на средата. Тази чувствителност е изследвана теоретично и експериментално, като е

изведена приложимостта на тези устройства в химични био-сензори. Също така, резонансните структури базирани на S0 вълна на Лемб показва висока чувствителност към външно налягане. Чувствителността към налягане е изследвана теоретично и експериментално. Устройството демонстрира възможност за значително подобрене в резолюцията до стойности под 1Pa. Не на последно място, представен е изобретен радиочестотен трансформатор на напрежение. Трансформатора е приложен в схема на ниско мощен комуникационен модул. Представените в тази глава разработки показват специфичните предимства на тънкослойната технология на S0 Лембови акустични вълни в приложения свързани с ниско-шумни генератори, датчици с висока резолюция и високо ефективни радиочестотни трансформатори. Приложенията на AlN резонатори базирани на S1 вълни на Лемб изглежда също възможно при използване на двустранна схема за възбуждане на вълната. Въпреки, че коефициента на електромеханична структура в тези структури остава по слаб от този демонстриран в резонансни структури на обемни акустични вълни, приложението има индустриален фокус поради предимства в цената на производството.

Глава 5 показва разработването на тънкослойната резонансна технология на A1 Лембови вълни, започвайки от физичните фундаменти. Основното приложение на този тип устройства е в широколентови филтри за телекомуникациите от пето и шесто поколение. Основните постижения на работата са свързани с проектирането на широколентови резонатори съвместими с радиочестотните мощности в съвременните телекомуникации. Три прототипа на широколентови филтри са демонстрирани на базата на седем ключови патента. Основните приноси включват проектирането на резонансни структури с акустично дебели електроди в преобразувателя, изобретяването на Y срезове на пиезоелектричния LiNbO_3 за получаване на максимална широчина на лентата на пропускане, изобретяването на филтърен дизайн с разпределени резонатори със сходна площ на пиезоелектричните мембрани, изобретяването на A1 Лембов резонатор върху акустичен отражател от Bragg тип и изобретяването на нов тип резонансни структури върху пиедестали от Bragg тип. A1 Лембовите резонатори се индустриализират в момента в продукти с изключително широки ленти на телекомуникационните филтри в честотния диапазон 4GHz – 7GHz.

А. Научни приноси

A.1 Изобретен е нов клас радиочестотни микро-акустични резонатори на базата на тънки пиезоелектрични слоеве. Тънкослойната технология базирана на Лембови акустични вълни е представена за пръв път. Едновходови и двувходови S0 Лембови резонатори с висока

производителност са проектирани, прототипирани и характеризирани върху напълно закрепени и конзолно закрепени AlN мембрани. Нова резонаторна структура с двойна електрическа шина е предложена за потискане на нежеланите напречни паразитни вълни в структурата. Разработени са S0 Лембови резонатори с вградена температурна компенсация на честотата на базата на композитни AlN/SiO₂ мембрани.

A2. Разработена е теоретична рамка за моделиране и оптимизация на тънкослойни резонатори на Лембови акустични вълни. Разширени и адаптирани са аналитични модели на базата на теоремата на Floquet-Bloch и функциите на Green. Аналитичните процедури са обогатени чрез използването на анализ посредством метода на крайните елементи. Разработената аналитична рамка е синергично интегрирана с модела на свързаните вълни за проектиране и оптимизация на микровълнови акустични прибори.

A3. Предложени и прототипирани са принципно нов тип резонансни структури на Лембови акустични вълни. Нова резонансна структура базирана на взаимодействието между S0 и A1 Лембови вълни е проектирана, прототипирана и характеризирана за пръв път. Нова резонансна структура базирана на S1 Лембова вълна с нулева групова скорост е проектирана, прототипирана и характеризирана за пръв път. Изобретен е радиочестотен трансформатор на напрежение базиран на S0 Лембова резонансна структура (WIPO Patent Application WO/2012/156818A2). Трансформатора е проектиран, прототипиран и интегриран в комуникационна схема работеща с изключително ниска консумирана мощност.

A4. Направени са изследвания във връзка с практичните приложения на тънкослойните Лембови резонатори. Честотен генератор с нисък шум, стабилизирани посредством S0 Лембов резонатор е проектиран, прототипиран и характеризиран за пръв път в схема с висока мощност и нисък базов термичен шум. Нови високо чувствителни S0 Лембови резонансни датчици на външно налягане и маса са изследвани теоретично и експериментално с оглед на подобряването на тяхната резолюция. Очертани са принципите за проектиране и приложението на тези резонансни датчици.

A5. Изобретен е тънкослоен резонатор на A1 Лембова вълна с разширена честотна лента и повишена работна мощност. Иновативен дизайн с акустично дебели електроди на преобразувателя както и със симетрично структуриране на резонатора за потискане на паразитните вълни е осъществен върху пиезоелектрични пластини от завъртян Y-срез на LiNbO₃. Изобретена е нова концепция за резонансно устройство на A1 Лембова вълна върху пиедестали структурирани като рефлексори на Bragg.

В. Научно-приложни приноси

В1. Разработената теоретична рамка е вградена в софтуер за проектиране на тънкослойни Лембови резонатори. Софтуера позволява проектирането на практически значими резонансни структури базирани на S0 вълни на Лемб. Извършено е интегриране към конвенционални симулатори за радиочестотен анализ, което подпомага индустриалното проектиране на такива резонатори.

В2. Като част от екип, авторът проектира първият самосъгласуван n79 филтър с ниски внесени загуби в лентата на пропускане и стръмни филтрови характеристики. Разработена беше система за оптимизация която синергично комбинира акустични модели, електромагнитни модели и модели за радиочестотно оптимизиране. Резултатите проправиха пътя на значими частни инвестиции в технологията, които доведоха до придобиването и от голям индустриален играч и последвалото и индустриализиране.

С. Приложни приноси

С1. Като част от екип, МЕМС технологията е специфично адаптирана към необходимите стандарти за успешно прототипиране на тънкослойни Лембови резонансни структури. Разработените диаграми на процесите позволи прототипирането на Лембови резонатори базирани на пиезоелектричен АІN.

С2. Като част от екип, се разработи комуникационна система с ниска консумирана мощност чрез специфично интегриране на трансформаторни чипове базирани на Лембови вълни.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научни публикации по дисертацията

1. G. Iriarte et.al., "SAW COM-Parameter Extraction in AlN/Diamond Layered Structures", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr., vol. 50, pp. 1542–1547, 2003
2. J. Bjurström, I. Katardjiev and V. Yantchev, "Lateral-field-excited thin film Lamb wave resonator", Appl. Phys. Lett., vol. 86, 2005.
3. V. Yantchev and I. Katardjiev, "Design and fabrication of thin film lamb wave resonators utilizing longitudinal wave and interdigital transducers," IEEE Ultrasonics Symposium, 2005., Netherlands, 2005, pp. 1580-1583
4. V. Yantchev and I. Katardjiev, "Propagation characteristics of the fundamental symmetric Lamb wave in thin aluminum nitride membranes with infinite gratings", J. Appl. Phys., vol. 98, pp. 849101-849107, Oct. 2005
5. J. Bjurström, V. Yantchev, I. Katardjiev, "Thin film Lamb wave resonant structures – The first approach", Solid-State Electronics, vol. 50, no. 3, pp. 322-326, 2006
6. V. Yantchev, I. Katardjiev, "Quasistatic transduction of the fundamental symmetric Lamb mode in longitudinal wave transducers", Appl. Phys. Lett., 88, 214101, 2006
7. V. Yantchev, J. Enlund, J. Bjurström and I. Katardjiev, "Design of high frequency piezoelectric resonators utilizing laterally propagating fast modes in thin aluminum nitride (AlN) films", Ultrasonics, vol. 45, pp. 208-212, Dec. 2006

8. V. Yantchev and I. Katardjiev, "Micromachined Thin Film Plate Acoustic Resonators Utilizing the Lowest Order Symmetric Lamb Wave Mode", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 54, no. 1, pp. 87-95, 2007
9. G. Wingqvist, L. Arapan, V. Yantchev, and I. Katardjiev, "A micromachined thermally compensated thin film Lamb wave resonator for frequency control and sensing applications," J. Micromech. Microeng., vol. 19, p. 035018, Mar. 2009
10. V. Yantchev, L. Arapan and I. Katardjiev, "Micromachined thin film plate acoustic wave resonators (FPAR): Part II," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 56, no. 12, pp. 2701-2710, 2009
11. I. Avramov, L. Arapan, I. Katardjiev, V. Strashilov and V. Yantchev, "IC-compatible power oscillators using Thin Film Plate Acoustic Resonators (FPAR)," 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, Rome, Italy, 2009, pp. 855-858
12. V. Yantchev, "Coupling-of-modes analysis of thin film plate acoustic wave resonators utilizing the S₀ Lamb mode," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 57, no. 4, pp. 801-807, April 2010
13. V. Yantchev, L. Arapan, I. Katardjiev and V. Plessky "Thin-film zerogroup- velocity Lamb wave resonator", Appl. Phys. Lett., vol. 99, No. 3, art. no. 033505, 2011
14. L. Arapan et. al., "Highly mass-sensitive thin filmplate acoustic resonators (FPAR)", Sensors, vol. 11, pp. 6942-6953, Jul. 2011.
15. L. Arapan, I. Avramov, V. Yantchev, "Thin film plate acoustic resonators for integrated microwave power oscillator applications", Electron. Lett., 47, p.453, 2011
16. E. Anders, I. Katardjiev and V. Yantchev, "Lamb wave resonant pressure micro-sensor utilizing a thin-film aluminum nitride membrane", J. Micromech. Microeng., vol. 21, no. 8, pp. 85010-85016, Aug. 2011
17. L. Arapan et. al, "An intermode-coupled thin-film micro-acoustic resonator", Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 22, no. 8, art.no. 085004, 2012
18. V. Yantchev, et. al., "Parametric study of thin-film zero-group velocity resonators (ZGVR)," 2012 IEEE Int. Ultrason. Symposium, Dresden, Germany, 2012, pp. 307-310
19. V. Yantchev and I. Katardjiev, "Thin film Lamb wave resonators in frequency control and sensing applications: A review", J. Micromech. Microeng., 23 (4), 043001, 2013
20. M. Moreria et. al, "Efficient RF voltage transformer with bandpass filter characteristics," Electron. Lett., vol. 49, no. 3, pp. 198–199, Jan. 2013.
21. C. Lin, V. Yantchev, J. Zou, Y. Chen, A. P. Pisano, "Micromachined One-Port Aluminum Nitride Lamb Wave Resonators Utilizing the Lowest-Order Symmetric Mode," in J. of Microelectromechanical Systems, vol. 23, no. 1, pp. 78-91, Feb. 2014
22. V. Yantchev and T. Mirea, "Suppression of transverse-mode spurious responses in thin film lamb wave resonators by bandgap engineering," 2014 IEEE Int. Ultrasonics Symposium, Chicago, IL, USA, 2014, pp. 2552-2555
23. T. Mirea, V. Yantchev, "Influence of liquid properties on the performance of S₀-mode Lamb wave sensors: A theoretical analysis", Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 208, pp. 212-219, 2015
24. T. Mirea, V. Yantchev, J. Olivares, and E. Iborra, "Influence of liquid properties on the performance of S₀-mode Lamb wave sensors II: Experimental validation," Sensors Actuators B Chem., vol. 229, pp. 331–337, 2016
25. V. Yantchev, J. Kriz, B. Oliver, A. Weidling and T. Fabian, "Design and fabrication of efficient piezo-MEMS voltage transformers," 2017 IEEE Int. Ultrasonics Symposium (IUS), Washington, DC, USA, 2017, pp. 1-1
26. S. Tin, J. Kriz, B. Oliverl, T. Fabian, and A. Weidlingl, G. Niemela, J. Sangid, A. Baruah, K. Harris, B. Blalock, J. Holleman, V. Yantchev, "N-Zero Integrated Analog Classifier (NINA)," in Proc. GOMAC Tech Conf., 2017, pp. 35–38.
27. P. J. Turner, B Garcia, V Yantchev et al., "5 GHz Band n79 wideband microacoustic filter using thin lithium niobate membrane", Electron. Lett., vol. 55, pp. 942-944, 2019.

28. S. Yandrapalli, V. Plessky, J. Koskela, V. Yantchev, P. Turner and L. G. Villanueva, "Analysis of XBAR resonance and higher order spurious modes," 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, UK, 2019, pp. 185-188
29. V. Yantchev, P. J. Turner and R. B. Hammond, "On the Efficiency of Excitation of High Coupling Plate Acoustic Modes," 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Las Vegas, NV, USA, 2020, pp. 1-3
30. J. Koulakis et. al., "XBAR physics and next generation filter design," 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Xi'an, China, 2021, pp. 1-5.

Патенти по дисертацията

1. V. Pleskii, S. Yandrapalli, R. B Hammond, B. Garcia, P. Turner, J. John, V. Yantchev, "Transversely-excited film bulk acoustic resonator", US Patent US10491192B1, 2018
2. B. Garcia, R. Hammond, P. Turner, V. Plesski, V. Yantchev, "Transversely-excited film bulk acoustic resonators for high power applications", US10637438B2, 2020
3. V. Yantchev, B. Garcia, V. Plessky. Transversely excited film bulk acoustic resonator using rotated Y-X cut lithium niobate. US10790802B2, 2020
4. V. Yantchev, "Transversely-excited film bulk acoustic resonator with half-lambda dielectric layer" US Patent US10868510B2, 2020
5. V. Yantchev, "Transversely-excited film bulk acoustic filters with symmetric layout", US Patent US10868513B2, 2020
6. V. Yantchev, et. al., "Solidly-mounted transversely-excited film bulk acoustic resonator", US Patent US11165407B2, 2021
7. V. Yantchev, "Transversely-excited film bulk acoustic resonators with solidly mounted resonator (smr) pedestals", US Patent US12237823B2, 2025
8. V. Yantchev, "Symmetric transversely-excited film bulk acoustic resonators with reduced spurious modes", US Patent US12323125B2, 2025

SUMMARY

The doctorate of science thesis entitled "The thin-film Lamb wave Resonator Technology" summarizes the scientific contributions of the author on the topic of thin film Lamb wave resonator technology, which was developed from the fundamentals up and includes large amount of theoretical and experimental contributions. The thesis contents cover 30 research publications and 8 US patents. The total amount of citations on the included research, excluding the self-citation, is exceeding 800 as of October 2025. An, important update on the S0 Lamb wave resonator technology was presented as an invited talk at the 2012 Int. IEEE Ultrasonic Symposium in Dresden, Germany. The next important leap of the technology related to the design of 5G communication filters based on the A1 Lamb wave was reported at the 2019 Int. IEEE Ultrasonic Symposium in Glasgow, Scotland. Recently, the technology has been brought to mass production with main application in the wideband 5G wireless communication systems.

Over the course of research number of advantages of the AIN based S0 Lamb wave have been revealed mainly in the timing and sensing domains. Independently from the first publication [1], STMicroelectronics in France has presented their original work on the topic few months later [20], which was followed by an independent publication by Pisano's group at University of California Berkeley, USA [21,22] and opened the field for many researchers

to earn their PhDs and to establish full academic positions. The application of this first-generation Lamb wave technology in RF communication filters, remained limited in RF filter technologies as the demonstrated resonance-to-antiresonance fractional bandwidth remained inferior to the well-established thin film bulk acoustic wave technology [23]. About 5 years after the thin-film Lamb wave resonator invention, the focus got extended not only on frequency scaling but also on devices with wide resonance-to-antiresonance fractional bandwidth, which required significantly larger electromechanical couplings. This necessity has been motivated by the requirements of the 5G telecommunications, which prioritized some new filters above 4GHz with frequency bandwidths of about 10% and above. In 2010 a breakthrough in the Lamb wave resonator technology have been made by M. Kadota et. al [24] demonstrating devices above 4GHz range with resonance-to-antiresonance fractional passbands of about 7%. These devices employed the A1 Lamb wave in epitaxially grown Z-cut LiNbO₃ thin film. Later with the advancement in the piezoelectric-on-insulator technology [25] this concept has been revisited [26]. During the last 7 years numerous specific inventions brought the A1 Lamb wave technology to industrial maturity. Some of these key enabling inventions are also presented in this doctorate of science thesis.

TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA



**Faculty of Industrial Technology
Department Theory of Mechanisms and Machines**

Assoc. Prof. Ventsislav Yantchev, Ph.D

THE THIN-FILM LAMB WAVE RESONATOR TECHNOLOGY

A U T H O R S S U M M A R Y

of a **HIGHER DOCTORATE THESIS FOR ACQUIRING THE RESEARCH
TITLE “*DOCTOR OF SCIENCES*”**

Domain: 5. Technical Sciences

Professional direction: 5.1 Mechanical Engineering

Field of research: Dynamics, strength and reliability of the machines, the
devices, the appliances and the systems

BULGARIA, SOFIA, 2025

This higher doctorate thesis has been discussed and considered for defense on 22.10.2025 by the department council of the Dept. Theory of Mechanisms and Machines, Faculty of Industrial Technology, Technical University of Sofia, Bulgaria.

The public defense of the thesis is scheduled for 04.02.2026 at 15.00 in the conference hall of the Library and Information Center (LIC) of TU-Sofia. The event will be conducted within a public meeting of the research council, appointed in accordance to order OЖ-5.1-95 / 13.11.2025 by the Rector of TU-Sofia as follow:

Habilitated members external to TU-Sofia:

1. Corresponding member of BAS, Prof. Dr.Sci. Eng. Venelin Stoyanov Zhivkov – Professional field 5.1 – Dept. Theory of Mechanisms and Machines, Faculty of Industrial Technology, TU – Sofia, Bulgaria
2. Prof. Eng. Ph.D Juliana Javorova Georgieva – Professional field 5.1 – Dept. Applied Mechanics, Faculty of Metallurgy and Materials Science, The University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, Bulgaria
3. Prof. Eng. Ph.D Ivan Nikolov Chavdarov – Professional fields 5.1 and 4.6, Dept. Mechatronics, robotics and mechanics, FMI, University of Sofia „St. Kliment Ohridski “, Sofia, Bulgaria
4. Assoc. Prof. Dr.Sci. Eng. Anastas Ivanov Ivanov – Professional field 5.1 – Dept. Mechanics, Faculty of Machinery and Construction Technologies in Transport, Todor Kableshkov University of Transport, Sofia, Bulgaria

Habilitated members internal to TU-Sofia:

1. Corresponding member of BAS, Prof. Dr.Sci. Eng. Georgi Dimitrov Todorov – Professional field 5.1 – Dept. Manufacturing Technology and Systems, Faculty of Industrial Technology, TU-Sofia, Bulgaria
2. Prof. Dr.Sci. Eng. Ivan Mladenov Kralov – Professional field 5.1 – Dept. Mechanics, Faculty of Transport, TU-Sofia
3. Prof. Ph.D Eng. Marin Hristov Hristov – Professional field 5.2 – Dept. Microelectronics, Faculty of Electronic Engineering and Technologies, TU-Sofia, Bulgaria

Thesis defense related materials can be found at the department office 4540 of the Dept. Theory of Mechanisms and Machines, Faculty of Industrial Technology, TU-Sofia, Bulgaria.

The candidate is with the Dept. Theory of Mechanisms and Machines, Faculty of Industrial Technology, Technical University of Sofia, Bulgaria.

Authored by: Assoc. Prof. Ventsislav Yantchev, PhD

Title: The Thin-Film Lamb Wave Resonator Technology

Issued: 30 copies by the publishing house of TU-Sofia, Bulgaria

CONTENTS

General description of the thesis	3
Summary of contents	7
CHAPTER 1. State of the art micro-acoustics before and after the invention of the thin film Lamb wave resonator technology	7
1.1 The radio frequency bulk acoustic wave resonator technology	7
1.2 The radio frequency surface acoustic wave resonator technology	9
1.3 The radio frequency Lamb wave resonator technology	11
CHAPTER 2. Analysis of the propagation and the excitation characteristics of S0 Lamb waves	14
2.1 Field analysis of S0 Lamb wave propagation under periodic gratings ...	14
2.2 Quasi-static transduction of the S0 Lamb wave by periodic strip gratings.....	17
2.3 Finite element analysis of S0 Lamb wave resonant structures	18
2.4 The Coupling-of-Modes (COM) analysis for the design and optimization of S0 Lamb wave devices	24
CHAPTER 3. Technology and prototyping of AlN based Lamb wave resonator structures.....	26
3.1 The first thin-film Lamb wave resonator prototypes	26
3.2 High performance S0 Lamb wave resonators	28
3.3 S0-A1 intermode-coupled Lamb wave resonators	34
3.4 Zero-group velocity S1 Lamb wave resonators	37
CHAPTER 4. S0 Lamb wave resonators in frequency control and sensing applications.....	39
4.1 An IC compatible power oscillator	39
4.2 A RF MEMS voltage transformer	42
4.3 RF gravimetric sensors	44
4.4 A RF pressure sensor	46
CHAPTER 5. A1 Lamb wave resonators on LiNbO ₃ sub-micrometer platelets	48
CHAPTER 6. The presented thesis in a nutshell	54
List of thesis related publications	58
Summary	60

GENERAL DESCRIPTION OF THE THESIS

Relevance of the topic

The thin-film electro-acoustic technology is a relatively new domain in research and innovation. It was founded with the invention of the thin-film bulk acoustic wave resonators back in the early 90s by K. Lakin from the Iowa State University in USA. This technology is actively being developed, demonstrating significant industrial viability. Currently, these micromechanical devices are employed in the mass market telecommunications as radio-frequency filters, demonstrating low losses and steep skirts. Significant research and development are focused on the development of various physical sensors (e.g gravimetric, pressure, temperature). During the last 20 years, the research in this field have been extended towards thin-film devices employing surface acoustic waves and Lamb waves. As a result, significant leap in performance and frequency of operation was achieved in telecommunication filters. Currently, the thin-film electro-acoustic filters are employed in mobile communications in the frequency range 0.7 GHz – 7 GHz. Different thin-film devices are employed within this frequency range. For frequencies bellow 3GHz the thin-fil surface acoustic technology is dominating, while for the frequency range above 5 GHz the thin-film technology Lamb wave is dominating. In the 3GHz – 5 GHz range the thin film bulk acoustic wave technology is without competition. The author of this thesis contributed significantly towards the research and innovation of all three types of thin-film resonant devices. In this thesis, only the contributions related to the thin-film Lamb wave resonator technology are considered. The low cost and technological compatibility with the integrated circuit technology makes this technology a promising candidate for application in next generation microwave integrated circuit devices. To this end the thin-film Lamb wave resonator technology is widely used in filters and multiplexers for the frequency band 5 GHz – 7 GHz. In addition, the market for the thin film resonator technology is extending towards highly sensitive, IC compatible gravimetric, pressure and temperature sensors. Large amount of contemporary research efforts is focused on the specific advantages of the thin-film Lamb wave technology with regard to the design of various high-performance sensors. In this thesis all aspects of the thin-film Lamb wave technology research are presented. More specifically, considered is the micromachining technology of Lamb wave resonators on piezoelectric thin-film membranes of aluminum nitride (AlN) and lithium niobate (LiNbO₃), further efficient modeling routines are developed to assist the design and the optimization of the thin-film Lamb wave devices. The state-of-art of the thin-film Lamb wave technology is laid out along with the specific scientific contributions and the latest aspects of the ongoing research efforts.

Objectives of the thesis, main problems addressed and research methods applied

The thesis considers the development of the thin-film Lamb wave resonator technology from the fundamentals up. It proposes systematic research regarding the theoretical, the technological and the application related aspects of the technology, starting from its physical foundations. Within this context, the thesis claims to be part of the invention and the foundation of the thin-film Lamb wave resonator technology, which practically was initiated with the first refereed publication in the beginning of 2005 in *Applied Physics Letters*. The thesis objective is defined as research on the thin-film Lamb wave technology in its theoretical, technological and applications related aspects. The problems solved as part of this thesis are formulated as:

- Development of analytic models for efficient analysis of Lamb wave resonant structures;
- Design of Lamb wave resonance structures with high Q factor;
- Adapting the MEMS technology towards the micromachining of micro-acoustic Lamb wave;
- Fabrication and characterization of thin-film Lab wave resonators with enhanced performance and inherent temperature compensation;
- Invention of novel resonant topologies based on acoustic Lamb waves.
- Design and characterization of low noise oscillators stabilized with thin-film Lamb wave resonators;
- Characterization of thin-film Lamb wave gravimetric and pressure sensors;
- Invention of thin-film Lamb wave resonant voltage transformers with application in near-zero power transceivers;
- Invention of wideband thin-film Lamb wave resonators;
- Design, fabrication and characterization of wideband telecommunication filters above 4GHz;

Scientific novelty

The research topic is new and modern by origin. The research was initiated with the submission of the first experimental data in 2004 and is active up to date, while demonstrating some industrially viable solutions. From the very beginning, the research was conducted in a very competitive environment together with renowned universities in USA, while during the last 10 – 15 years, research teams from Japan, China and Singapore have

been actively contributing. Most of the colleagues working on this topic have already been promoted to full professor positions in the top 100 ranked universities worldwide. The research and innovations on the thin-film Lamb wave resonator technology remained limited to research organizations with access to cleanroom environments with utilized MEMS technology. The financial threshold for this type of research is relatively big and limits the inclusion of excessively broad research community. Thus, the number of generated citations in such environment is also limited. Currently the technology is industrially developed only in high-tech countries like USA, Japan and China.

The presented work includes few new aspects of the research, which were developed in synergy in view of achieving the thesis objective. These aspects are as follow:

- The development of the theoretical modeling tools represents an adaptation of the analytical models for the analysis of surface acoustic waves towards the Lamb wave resonator analysis. For the first time Lamb wave resonators are analyzed by means of the coupling-of-modes theory. New methods for finite element analysis were elaborated and applied to the analysis of thin-film Lamb wave structures.
- For the first time were fabricated thin-film Lamb wave resonant structures. The employed technology is adapted from the industrial thin-film bulk acoustic wave resonator technology by introducing additional technological routines, specific for the Lamb wave resonator structures. Subsequently, the technology was adapted to piezoelectric layers formed by layer transfer techniques.
- Invented are Lamb wave resonators with intermode A1-S0 Lamb wave coupling. Invented are Lamb wave resonators employing a zero-group velocity S1 Lamb wave. Invented are wideband A1 Lamb wave resonators for operation at high frequency with moderate power handling. Invented are resonance structures with periodically structured pedestals.
- New applications in frequency control and high-resolution sensing are identified.

Practical relevance

The thin-film Lamb wave resonator technology is considered an important subdomain of the micro-acoustic wave technology. The results included in this thesis have always been leading and at the forefront of the research on this filed at the time of their publication. Accordingly, the research was conducted quite ahead from any practical applications. During the research and innovation efforts certain advances of the thin-film Lamb wave resonators were outlined. More specifically, the ability to achieve low noise

performance in oscillators stabilized with thin-film Lamb wave resonators in combination with the highly sensitive response to gravimetric and ambient pressure biases promote the use of these devices in sensors with high resolutions. The Lamb wave voltage transformers represent an entirely new type of applications in the low power communications. The thin-film Lamb wave resonators employing S1 mode in AlN and A1 mode in LiNbO₃ membranes have demonstrated advantages for telecom filter applications. In May 2025, Murata Manufacturing (Japan) announced the first ever commercial wideband Wi-Fi filter based on the A1 Lamb wave resonators. The field is still in development and new industrially relevant applications are expected.

Approval

The results from this thesis are:

- published in 21 refereed and indexed journals with IF;
- presented and published in 8 refereed and indexed in international IEEE conferences on the subject;
- presented and published in 1 refereed conference GOMACTech (microcircuit applications for government systems) in USA;
- published in 8 US patents;

Citations: More than **800** citations (excluding self-citations) of the related published research are seen in SCOPUS, as of October 2025. It is noted that the average IF of the field is in the range of 2.

Publications

The main results are published in renowned scientific journals as Applied Physics Letters (AIP), Journal of Applied Physics (AIP), Transactions in UFFC (IEEE), Journal of Microelectromechanical Systems (IEEE), Journal of Micromechanics and Microengineering (IOP), Sensors and Actuators B (Elsevier), Solid-State Electronics (Elsevier), Ultrasonics (Elsevier), Electronics Letters (IET). Significant summary of the results was presented as an invited talk at the 2012 IEEE Int. Ultrasonic. Symposium.

The diversification of the publications towards wider number of scientific journals was intentional in view of achieving maximal publicity of the achieved results.

Structure and contents of the thesis

This thesis includes 281 pages and consists of introduction, 4 chapters, description of research contributions, list of included publications (38 in total), references including 198 public sources, and closing remarks. The thesis includes about 204 figures, 21 tables and 54 formulas. The enumeration of the figures, formulas, tables and references in this thesis summary corresponds to the one used in the thesis work.

SUMMARY OF CONTENTS

CHAPTER 1. STATE OF THE ART MICROACOUSTICS BEFORE AND AFTER THE INVENTION OF THE THIN FILM LAMB WAVE RESONATOR TECHNOLOGY

The research on thin film Lamb wave resonator technology started back in 2005 with the first scientific publications on the topic [1,2]. During the following 10 years there have been very intensive research on this subject, which continues up to date. The emergence of this research direction has been stimulated by the necessity for increasing the frequency of operation, while employing state of art deep ultraviolet (DUV) lithography systems. Two main branches of the micro acoustic technology were dominating at that time. The surface acoustic wave (SAW) technology was represented by the leaky surface acoustic wave (LSAW) and the temperature compensated surface acoustic wave (TC-SAW) topologies, which were characterized with low cost and relatively easy manufacturing but also with relatively low performance characteristics. These were limited in both quality (Q) factors and frequency of operation. Thus, the commercially viable SAW products reached maximum frequency below 3.0GHz. The other technology, that dominated the market was the thin film bulk acoustic wave (BAW) technology which offered significant advantages in the frequency range above 2GHz in terms of very high Q factors and robust frequency scaling which does not require complicated lithography processes. Follows a brief review on the evolution of those key technologies, including the time prior and after the invention of the thin-film Lamb wave resonator technology. This review is meant to provide the context in which the Lamb wave technology research was initiated by the author of this thesis as well as the overall evolution of these technologies, including the Lamb wave technology, up to date.

1.1 The radio frequency bulk acoustic wave resonator technology

Radio frequency bulk acoustic wave technology originates from the invention of the thin film bulk resonator technology, based on c-textured AlN films on Silicon substrate, more than 30 years ago by Kenneth Lakin [3] from Iowa state University, USA. The device concept was further promoted and brought to commercial viability by Rich Ruby [4], initially as part of HP Labs, Palo Alto, CA, USA. He introduced the first FBAR (film bulk acoustic resonator) product for cell phone applications in 2000 – 2001. The following decade was the decade of the thin film bulk acoustic wave resonator technology, which performance has reached unprecedented for the micro acoustic technology figures of merit. This first-generation technology has demonstrated Q factor of 5000 at 2GHz, while temperature coefficient of frequency (TCF) and power handling exceeded the state of art surface acoustic wave technology. Unlike, the surface acoustic wave technology, the resonance frequency 'f' of bulk acoustic wave resonators is determined by the device thickness 'd' approximately as $f=V/(2d)$, where V is the acoustic

wave velocity. This aspect of the technology, makes the thickness control and thickness uniformity along the wafer very critical for achieving high yield in mass production. This requires additional trimming and frequency setting procedures, which makes the technology more expensive than its surface acoustic wave counterpart. Therefore, significant research efforts were directed towards the frequency range enhancement and performance improvement of surface acoustic wave technology at this time. About 15 years ago, the Sc doped AlN film was invented by M. Akiyama [5], demonstrating a significant boost in piezoelectric response as function of Sc concentration. This technology has further been implemented in the FBARs with specific interest to boost the resonance – to – antiresonance (R-aR) fractional bandwidth to levels suitable for wider band applications. Further, the moderate increase of the dielectric permittivity enabled some size reduction in the RF filter die size. The first promising results were published right after the discovery of the material [6, 7] and the research continues up to date. As result the second-generation bulk acoustic wave resonators technology widely use Sc doped AlN thin films with Sc concentrations of about 10% and larger. Currently, AlScN thin films with Sc concentrations in excess of 30% are needed for the design of sub 7 GHz filters with relatively large bandwidths. Electromechanical coupling in excess of 20% with Q factor in excess of 1000 have been recently demonstrated at 6 GHz [8]. This frequency range becomes challenging, especially when it comes to large volume production, where functional and thickness uniformity along 6" and 8" wafers, as well as wafer to wafer repeatability is a must. There is, already, a significant leap forward in this domain, although further improvements are needed [9]. One specific challenge is related to the frequency scaling above 4 GHz, where the AlScN become as thin as 250nm and the thickness and functional uniformity becomes more difficult to achieve. Above 6 GHz, is more appropriate the use of bulk acoustic wave resonators employing multilayered piezoelectric structures with opposite polarity of the adjacent piezoelectric thin films. Such structures are generally able to support higher overtone bulk acoustic wave thickness mode resonances, while retaining the electromechanical coupling and Q factors. Further, due to the smaller loading effects of the electrodes in such structures the AlScN film thicknesses are significantly larger than those in their fundamental mode counterparts. The latter imposes better process control inherent for the deposition of thicker AlScN films. One very important aspect of working with higher overtone multilayered thin films is the ability to enhance the power handling capabilities of the technology, provided that the devices demonstrate high Q factors comparable to the fundamental mode technology. The frequency scaling rules in RF filters, require the use of resonators which electrode border to area ratio scales as $1/f$ (here f is the frequency), the area scales with $1/f^2$, and the resonator volume scales with $1/f^3$. As a result, fundamental mode resonators for sub 7 GHz filters become

too small in volume, which imposes large energy densities and limited power handling. Further the heat resistance increases as the area of the devices becomes smaller and becomes more difficult to release the heat out from the resonator when operating under high powers. Finally, the electrode area to border ratio decrease with frequency, which makes the edge effects dominating the performance through loss of Q factor and increase of spurious mode content. All this is a strong motivation for the ongoing development of the overtone bulk acoustic wave technology. Currently Akoustis Inc. (a SpaceX subsidiary) is the company developing this technology for the market. The technology aspects include deposition of epitaxial and polycrystalline AlScN films, along with polarity inversion techniques and layer transfer techniques as part of the resonator and filter fabrication [10]. This technology facilitates the frequency scaling between 5GHz and 15GHz with good prospects for mass production evolving thus into a third-generation technology with specific application in the high frequency range. A new and quite promising direction is the use of ferroelectric behavior of Sc doped AlN with Sc concentration near 30%. Frequency tuning and intrinsic polarization switching of film bulk acoustic resonators (FBARs), based on sputtered AlScN piezoelectric thin films have recently been demonstrated [11].

1.2 The radio frequency surface acoustic wave resonator technology

Over the time the RF surface micro-acoustic wave technology has evolved through three distinctive stages (three technology generations). Starting with the leaky surface acoustic wave (LSAW) on rotated $36^\circ - 48^\circ$ Y-cut of LiTaO_3 , about 20 years ago upgrading to temperature compensated surface acoustic wave (TC-SAW) on 128° Y-cut LiNbO_3 and about 10 years ago evolved to incredibly high-performance surface acoustic wave (I.H.P SAW) technology on piezoelectric on insulator (POI) substrates [12]. Usually, the piezoelectric thin films are LiTaO_3 or LiNbO_3 single crystal platelets with rotated Y-cut crystal orientation. In its nature the I.H.P SAW technology belongs to the class of Love waves. More specifically, these are acoustic wave with predominantly shear polarization guided by a lower velocity layer (e.g LiTaO_3) on top of a high velocity substrate (e.g Si). One important advantage of the surface acoustic wave technology is that frequency scaling is defined by means of lithography, while the substrate thickness is not of big importance. The waves are excited by means interdigital transducer (IDT), whose pitch 'p' determines the resonance frequency approximately as $f=V/(2p)$, where V is the surface acoustic wave velocity. This latest (3rd) generation of surface acoustic wave technology is currently dominating the market for frequencies up to 3GHz, offering performance characteristics comparable and often exceeding that of state of art bulk acoustic wave technology, while keeping the technology robust. Beside the investigations aiming at increase of the Q factor and improvement in the temperature

stability during the second technology generation, significant research efforts have been directed towards utilization of surface acoustic waves on high velocity substrates, where the acoustic wave velocity may exceed 10000 m/s, which is more than two times larger than that of the surface acoustic waves on conventional substrates like LiTaO_3 and LiNbO_3 substrates. The latter is providing an ability to scale the frequency, while keeping the lithography robust. Within the technological race with the bulk acoustic wave technology, it was shown that the AlN /Diamond system can offer almost the highest SAW velocity in nature [13]. It follows from the fact that the surface acoustic wave in diamond has the highest velocity among all materials, and thus, when combined with a piezoelectric layer provides a good platform for high frequency SAW devices [14]. For more than 10 years this has been a dominating research activity in the field of microwave acoustics although with limited practical success. The main issue with the diamond-based structures is the use of polycrystalline diamond, which offers limited Q-factors owing to the enhanced mechanic losses in the material. Within these efforts it was recognized the potential of the thin S_0 mode Lamb wave in thin AlN films. The mode has low velocity dispersion and acoustic wave velocity of up to 10000 m/s with low acoustic losses. These characteristics have made the S_0 Lamb wave a promising alternative to the high velocity surface acoustic waves. This specific development is discussed more in detail in the next section. Currently, the research on surface acoustic waves is mainly focused on the ability to scale the frequency of the piezoelectric on insulator-based surface acoustic wave technology up to the 6 - 7 GHz frequency range. One option in the frequency scaling is through technological advances in lithography, which enable the state of art POI substrates to be used up to 5GHz [15]. Unfortunately, that often requires lithography beyond the resolution of the DUV systems, which makes this approach commercially not viable. Another option, currently in investigation is the use of specific cut of piezoelectric LiNbO_3 layer on top of high velocity 4H-SiC substrate that support longitudinal leaky surface acoustic wave (LLSAW) with large electromechanical coupling [16]. This acoustic wave has 50% larger velocity than the conventional SAW and allows the design of devices with 50% larger IDT pitches at the same frequency. In this specific high velocity surface acoustic wave concept, the polycrystalline diamond is replaced by 4H-SiC, which is a material with very high acoustic Q and high acoustic velocity. Alternatively, the high velocity material under the piezoelectric layer can be replaced by dielectric acoustic mirror consisting of layers with alternating acoustic impedances and velocities [17]. This technological development is still in progress and if successful can offer solutions for wide band filters like n79, Wi-Fi 5, Wi-Fi 6.

1.3 The radio frequency Lamb wave resonator technology

Although we consider three distinctive technologies, in fact those are having common physical ground. These are employing micro-acoustic waves guided in solid media. On figure 1.1, dispersion characteristics of the first two orders of Lamb waves propagating in platelet with thickness 'd' are shown. The wave number $K_{xy} = 2\pi/\lambda$ is the lateral wavenumber defined by the lateral wavelength λ . The A_0 wave, known also as the lowest order antisymmetric Lamb mode, is the lowest velocity guided wave in the platelet and is exhibiting mainly a vertical shear polarization. The S_0 wave, known as the lowest order symmetric Lamb mode, is a high velocity and low dispersion mode when propagating in acoustically thin platelets. The velocity approaches that of the longitudinal acoustic wave velocity in the material, owing to the predominantly longitudinal polarization of the wave. The A_1 wave, known also as the first order antisymmetric Lamb mode, originates from the fundamental shear acoustic wave resonance along the platelet thickness. This mode has a cut-off frequency coinciding with the thickness shear wave resonance. The S_1 wave, known also as the first order symmetric Lamb mode, originates from the fundamental longitudinal acoustic wave resonance along the platelet thickness. This mode has a cut-off frequency below the thickness longitudinal wave resonance f_R . For acoustically thick plate ($K_{xy}d \gg 1$) the dispersion curves of all Lamb waves converge to the dispersion of surface acoustic wave in the media. Thus, the surface acoustic wave appears as the Lamb wave limit in semi-infinite substrate, while the various bulk wave resonances along the thickness appear as the corresponding Lamb wave limit at zero K_{xy} (infinite lateral wavelength).

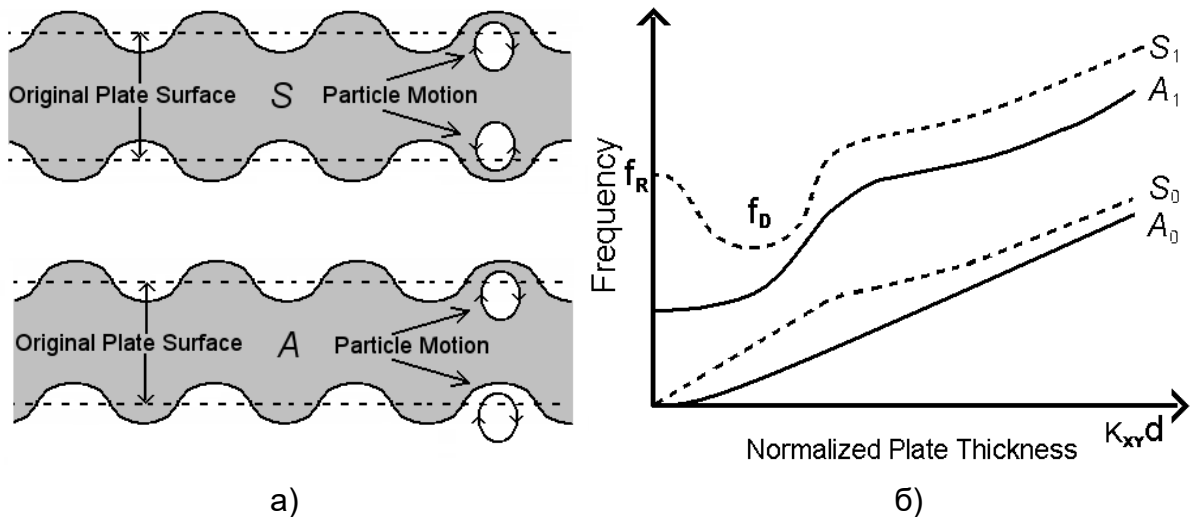


Figure 1.1 Lower order Lamb waves in acoustically thin platelets a) Lamb wave polarization b) Lamb wave dispersion

As discussed above, the thin film Lamb wave resonator technology has been invented to address issues with frequency scaling in devices controlled with transducer pitch such as surface acoustic wave devices. Thus, the first

device prototypes [1, 2] employed the S0 Lamb wave in AlN thin film membrane, which is known for its very high velocity of up to 10 000 m/s and low dispersion when propagating in acoustically thin platelets [18]. In fact the S0 mode in AlN membranes exhibit weaker velocity dispersion and larger electromechanical coupling as compared to the 1st order Sezawa (surface acoustic wave) mode in AlN/Diamond/Si substrate [18].

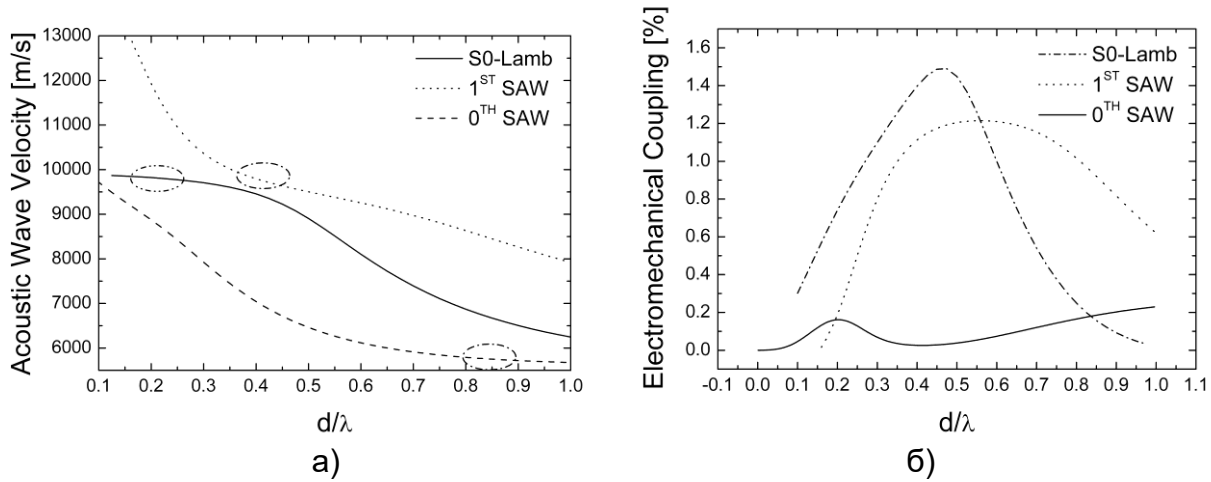


Figure 1.2. Propagation and excitation characteristics of fast acoustic modes in AlN thin film structures. a) Velocity dispersions b) Electromechanical couplings

In Figure 1.2 the velocity dispersions and the electromechanical couplings are shown as calculated using Adler's technique [19], for the first two surface acoustic wave modes in ALN/Diamond structure and the S0 Lamb wave in AlN thin film membrane. For the 0th SAW mode AlN thicknesses greater than 0.8λ , offer reduced sensitivity but the wave velocity is unacceptably low. The 1st SAW mode demonstrates both reduced sensitivity and high velocity in the range $0.4\lambda - 0.5\lambda$ thick AlN. The S0 mode exhibits low velocity dispersion for membrane thicknesses below 0.3λ , while offering at the same time high acoustic wave velocity. Both the 1st SAW and the S0 have comparable couplings considerably higher than the coupling of the 0th SAW mode. At AlN thickness of 0.4λ the 1st SAW exhibits a coupling close to the maximum achievable which matches well with the decreased sensitivity to AlN thicknesses discussed above. The S0 mode exhibits its maximum coupling at an AlN thickness of around 0.45λ in excitation driven by a regular interdigital transducer (IDT). Other transduction schemes can offer significantly larger electromechanical couplings at thinner AlN.

Over the course of investigation number of advantages of the S0 Lamb wave have been revealed mainly in the timing and sensing domains. Independently from the first publication [1], STMicroelectronics in France has published their original work on the topic few months later [20], which was followed by an independent publication by Pisano's group at University of California Berkeley, USA [21,22] and opened the field for many researchers to earn their PhDs and to establish full academic positions. The application of this first-generation Lamb wave technology in RF communication filters,

remained limited in RF filter technologies as the demonstrated resonance-to-antiresonance fractional bandwidth remained inferior to the well-established thin film bulk acoustic wave technology [23]. About 5 years after this invention, the focus got extended not only on frequency scaling but also on devices with wide resonance-to-antiresonance (R-aR) fractional bandwidth, which required significantly larger electromechanical couplings. This necessity has been motivated by the requirements of the 5G telecommunications, which prioritized some new filters above 4GHz with R-aR of about 10% and above. These requirements were met by the bulk acoustic wave technology employing a Sc doped AlN thin films with Sc concentration of 30% and above. This research direction has been clearly set after 2010, based on the promising initial results [5-7]. Also, in 2010 significant leap forward in the Lamb wave resonator technology have been made by M. Kadota et. al [24] demonstrating devices above 4GHz range with R-aR of about 7%. These devices employed the A1 Lamb wave in epitaxially grown Z-cut LiNbO₃ thin film. Later with the advancement in the piezoelectric-on-insulator (POI) technology [25], this concept has been revisited employing microelectromechanical system (MEMS) structures with two narrow electrodes with relatively large distance to each other, resembling the excitation scheme of a lateral field excited bulk acoustic resonator [26]. Combining the latter concept with the interdigital transducer concept employed by Kadota [24] resulted in an admittance scalable device with large R-aR bandwidths, that have been named as XBAR (laterally excited thin film bulk acoustic resonator) [27]. These first devices, using thin electrodes on thermally resistive LiNbO₃ have limited ability to dissipate heat and were not suited for high power handling, required in contemporary communication systems. In a following technological leap, a structure with thick electrodes and retained performance was proposed [28], which has brought the ability to design and prototype the first wide band Lamb wave filter (n79 band) above 4 GHz [29]. Finally, a significant leap in A1 mode electromechanical coupling was achieved with the invention of the 120°Y family of LiNbO₃ rotated cuts [30]. These achievements have shaped the second-generation Lamb wave technology, while opening the possibility to apply the Lamb wave technology in communication filters for 5G. As a result the research on wide R-aR bandwidth devices has become a very hot topic during the last 5 years. Wide band devices employing the S0 Lamb wave [31], the S0-like surface acoustic wave [32], the SH0 plate acoustic wave [33] as well as the SH1 plate acoustic wave [34] have been proposed. It is further noted that the Lamb wave resonator technology is mainly dealing with Lamb waves in acoustically thin piezoelectric platelets (i.e $d/\lambda < 1$) due to the unique propagation and excitation characteristics of the waves in this design window.

CHAPTER 2. ANALYSIS OF THE PROPAGATION AND THE EXCITATION CHARACTERISTICS OF S0 LAMB WAVE

2.1 Field analysis of S0 Lamb wave propagation under periodic strip gratings [35]

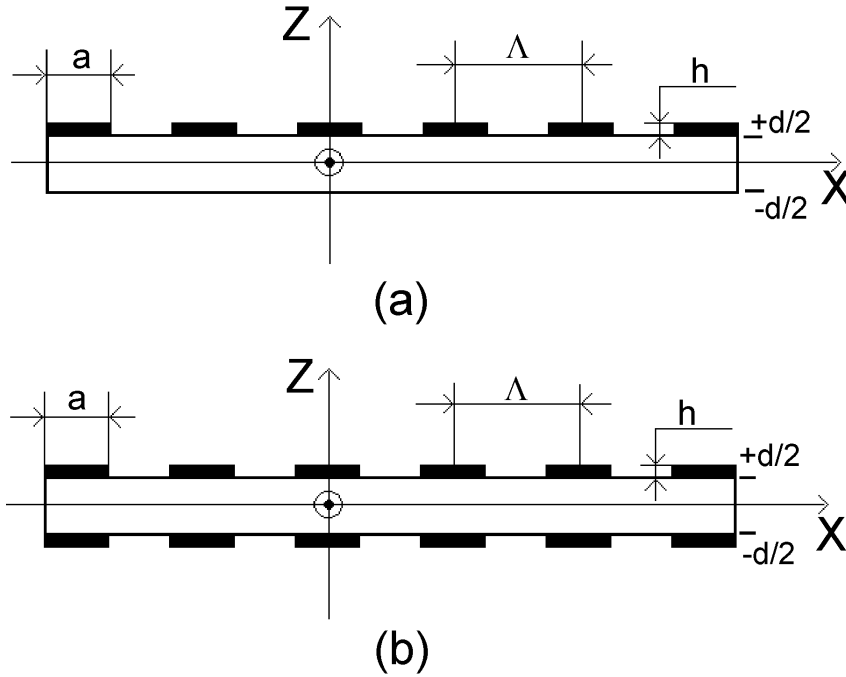


Figure 2.2. Plate wave grating structures. a) single side b) double side gratings

In this section the structures sketched on figure 2.2 are analyzed. The general solution for the components of the acousto-electric field is derived in agreement with the Floquet-Bloch theorem as follows:

$$\begin{cases} u_1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^3 \theta_{i,n} A_{i,n} [\cos(\alpha_{i,n}z) - \tau_{i,n} \sin(\alpha_{i,n}z)] e^{-j\beta_n x} \\ u_3 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^3 \theta_{i,n} B_{i,n} [\sin(\alpha_{i,n}z) + \tau_{i,n} \cos(\alpha_{i,n}z)] e^{-j\beta_n x}, \\ \varphi = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^3 \theta_{i,n} C_{i,n} [\sin(\alpha_{i,n}z) + \tau_{i,n} \cos(\alpha_{i,n}z)] e^{-j\beta_n x} \end{cases} \quad (2.6)$$

where, $\beta_n = \beta + \frac{2\pi n}{\Lambda}$ (Λ the pitch of the periodic grating), is the n^{th} ($n \in (-\infty \div \infty)$) spatial harmonic of the wavenumber, β is the Floquet wavenumber, $\alpha_n(\beta_n)$ is the wavenumber along the Y axis of the n^{th} spatial harmonic. For each harmonic, the three components of the field $u_1^{(n)}$, $u_3^{(n)}$ и $\phi^{(n)}$ are connected through the wave amplitudes A_n , B_n and C_n which are derived as an eigen-vector for the eigen values $\alpha_n(\beta_n)$ of a homogenous linear system of equations, which is formed by substituting the general solution above into the Poisson's and wave propagation differential equations. The constants $\theta_{i,n}$ and $\tau_{i,n}$ are derived as eigen-vectors of a linear system of equations derived from the electrical and the mechanical boundary conditions. The approximation used here presumes a zero-charge density on the platelet surfaces, while the mechanical boundary conditions are applied in a first order of approximation

as derived by Datta-Hussinger [36,37]. Within this approximation, the normal stresses on the platelet surfaces are linearly dependent on the electrode grating thickness h as follows:

$$T_{31}^{Strip} = h \left\{ u_1 \rho' \omega^2 + c' \left[\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial u_1}{\partial x} \left[\delta \left(x + \frac{\eta \Lambda}{2} \right) - \delta \left(x - \frac{\eta \Lambda}{2} \right) \right] \right] \right\}, \quad 2.11a$$

$$T_{33}^{Strip} = u_3 \omega^2 h \rho', \quad 2.11b$$

where h is the thickness of the electrodes of the periodic grating, ρ' is the electrode mass density, $\eta = a/\Lambda$ is the metallization ratio of the grating, $c' = 4\mu'(\lambda' + \mu')/(\lambda' + 2\mu')$, λ' , μ' are the effective elastic constant, and the Lamé constants of the electrodes.

Substituting the general solution in the boundary condition equations we arrive at 3xn linear system of equations:

$$\gamma^S \theta_{i,n} \Psi_{i,n}(\beta) = \frac{h \rho'}{\Lambda \rho} c_{LB} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \theta_{i,q} A_{i,q} \cos(\alpha_{i,q} \pi d / 2\Lambda) \frac{\sin(q-n)\pi\eta}{(q-n)} \left\{ \omega^2 - \frac{\rho}{\rho'} \frac{c'}{c_{LB}} \beta_q \left[\beta_q - 2(q-n) \right] \right\}, \quad 2.14$$

$$\gamma^S \theta_{i,n} \Gamma_{i,n}(\beta) = -\frac{h \rho'}{\Lambda \rho} \omega^2 c_{LB} \frac{\sin(q-n)\pi\eta}{(q-n)} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^3 \theta_{i,q} B_{i,q} \sin(\alpha_{i,q} \pi d / 2\Lambda),$$

$$\gamma^S \theta_{i,n} \Omega_{i,n}(\beta) = 0,$$

which is solved under the coupling of modes approximation ($n=0, -1$), interpreted as connection between incoming and reflected wave from the grating structure. As an end result, we obtain the dispersion characteristics of the Floquet wavenumber $\beta(\omega)$.

In figure 2.3 the real and the imaginary parts of the Lamb wave propagation constant are shown as a function of frequency for the symmetrically and asymmetrically loaded plates for equal electrode and plate thicknesses. The frequency is normalized to the central frequency of the bulk longitudinal wave propagating in the 'x' direction. The centers of the stopbands coincide with the continuously loaded Lamb wave velocities (reflections omitted), thus giving rise to a slowing down effect. A similar but somewhat different effect is observed in the stop band characteristics of the surface transverse waves. It can be seen that outside the stop band the dispersion tends to approach that of the continuously loaded Lamb wave. The increase of the stopband indicates enhanced reflectivity in the case of double side grating configurations. The variation of the upper stopband edge with both the grating strip and plate thickness is lower than that of the lower stopband edge (as can be seen in Fig. 2.4 and Fig. 2.5 in the thesis).

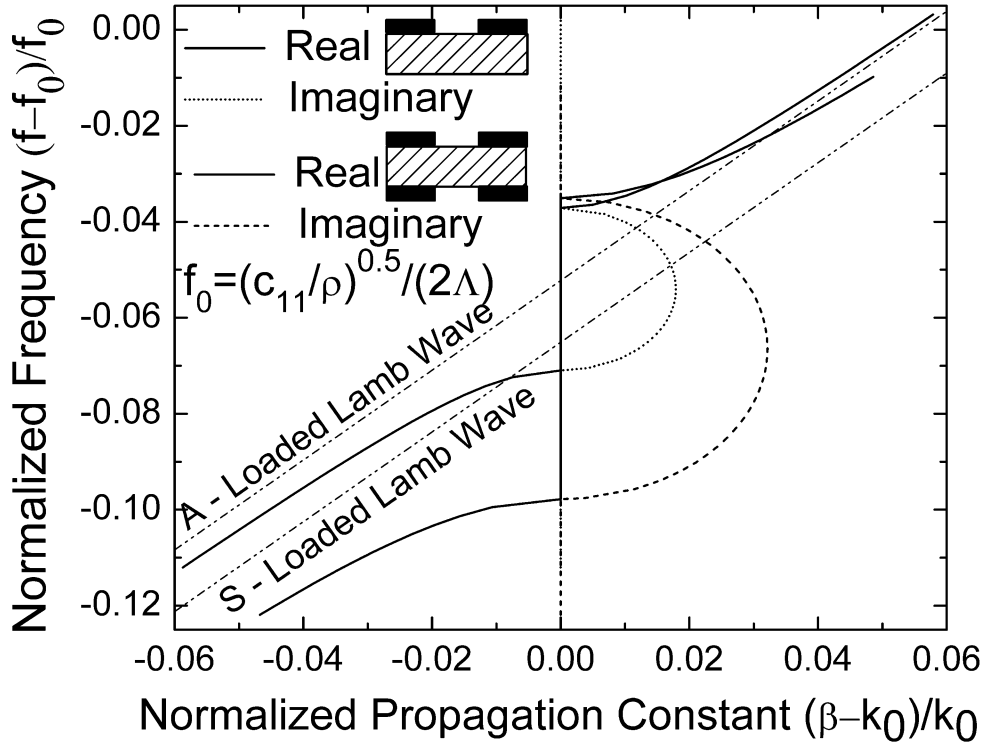


Figure 2.3 Comparison between the dispersion curves for the S0 wave in one- and double-sided grating configurations respectively. The labels “S-Loaded” and “A-Loaded” are used to denote the symmetric and asymmetric continuously loaded Lamb wave respectively.

The latter is due to the slowing down effect and is expectedly weaker for the single side grating configurations in comparison with the double side grating configurations. The observed slowing effect has a relatively complex nature due to a variety of factors acting simultaneously. Thus, the deposition of grating strips leads to an effective increase of the plate thickness, which causes a decrease in the velocity. Another slowing down effect arises from the lower velocity of propagation in the aluminum strips. In addition, the reflection induced contributes towards a further slowdown of the wave at the lower stop band edge and towards increase in the propagation velocity at the upper stopband edge. Therefore, the behavior of the stopband results from simultaneously acting processes of different origins. Thus, the sensitivity of the lower stopband edge can be much greater than that of the upper stopband edge. The observed behavior is of primary importance for the design of Lamb wave based resonant structures. As it is well known, such devices involve operation at frequencies lying in the stopband, where the reflection coefficient of an infinite grating features a magnitude that equals 1 and a phase in the $(0 \div \pi)$ range. The specific design ensuring a proper operating frequency is to be done according to the specific application. When the device is to be used as a sensing element, it is hence advantageous to employ a design ensuring device operation at the lower

stopband edge where the sensitivity is greatest. When devices for frequency control are to be designed, special care on the impact of the technology tolerances on the device performance is needed. Therefore, the device should be designed to operate at the upper stopband edge which is shown to be less sensitive and with proper design the sensitivity can be cancelled to its first order. The significantly improved reflectivity in the double side grating results in substantial benefits since in thin film electroacoustic devices the membranes are with restricted dimensions, which in turn limits the number of grating strips that can be used. Further, this type of configuration exhibits clearly a pronounced reduction in the sensitivity of the upper stopband edge in comparison with the single side grating. As described elsewhere devices exploiting double side reflectors exhibit significant structural defects, because the AlN film has been deposited directly onto the patterned bottom strips [40]. These technological imperfections are thought to be readily eliminated by introducing an additional chemical mechanical polishing (CMP) step to bury the Al electrodes into a sacrificial layer, resulting in a planarized surface for the subsequent AlN deposition. The dual side grating topology is also the topology that can bring the highest electromechanical coupling of the S0 and S1 Lamb waves [41].

2.2 Quasi-static transduction of the S0 Lamb wave by periodical strip gratings [48,49,51]

Along with the general quasi-static analysis of interdigital transducer (IDT), a specific contribution of this thesis is in the adaptation of the Green's function approach towards the analysis of a periodic array of longitudinal wave transducers. This type of transducer topology employs a periodic grating with twice larger pitch as compared to the IDT pitch, for the same acoustic wavelength. The analysis is performed for the case of thin c-oriented AlN membranes owing to their practical relevance. It can be readily adapted for the analysis of S0 modes in arbitrary thin films.

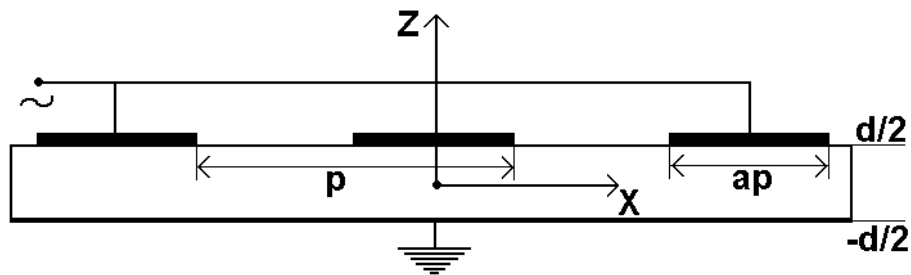


Figure 2.6 Schematic view of a comb transducer consisting of n periodic array of longitudinal wave transducers electrically connected in parallel.

Consider a piezoelectric thin film of thickness ' d '. The comb transducer consists of a periodic structure, having a pitch ' p ' and a metallization ratio ' a ', placed on either side of the membrane in order to generate the fundamental

symmetric Lamb wave (see figure 2.6). According to the Ingebrigtsen's approximation, the Green function for the S0 Lamb wave is derived as:

$$G_{Lamb}(x) = j\Gamma_s \exp(-jk_0|x|), \quad 2.19a$$

$$\Gamma_s \approx [2\varepsilon_s(\infty, k_0 d)]^{-1} k_{Lamb}^2, \quad 2.19b$$

where, $k_{Lamb}^2 = 2(V_{OC} - V_{SC})/V_{OC}$ is the intrinsic Lamb wave electromechanical coupling, V_{OC} and V_{SC} are the Lamb wave velocities at free (open circuited) and metallized (short circuited) surface, respectively. Using the thus defined Green's function the conductance $G(\omega)$ is readily obtained from the power carried by the radiated Lamb wave [46]:

$$G(\omega) = \omega W \Gamma_s |\hat{Q}_e(\beta)|^2 \text{ at } \beta=k_0, \quad 2.20$$

where W is the transducer aperture and the charge density $\hat{Q}_e(\beta)$ is the Fourier transform of the charge density $Q_e(x, \omega)$, equal to $\sigma(x, \omega)$ calculated at a unit voltage applied on the strips. In the case of comb transducers, the charge distribution over the strips was shown to be symmetric and nearly constant [47]. In here, $Q_e(x, \omega)$ is calculated under the approximation of a uniform charge distribution over the strips. At a uniform charge distribution, the charge density in the structure can be written as:

$$Q_e(x, \omega) := \sigma_0 \sum_{n=1}^N U(\tau_n + p \cdot a/2) U(p \cdot a/2 - \tau_n), \quad 2.21$$

where $U(x)$ is the unit step function, N the number of strips and σ_0 a constant determined from the condition relating the charge on a given electrode with unit potential to its capacitance $C_s = \varepsilon_{33}apW/d$. Using the properties of the geometric progression, the following expression for the Fourier harmonics $\hat{Q}_e(\beta)$ is obtained:

$$\hat{Q}_e(\beta) = \frac{2\sigma_0}{\beta} \sin(k_0ap/2) \frac{\sin(N\beta p/2)}{\sin(\beta p/2)} e^{j(N-1)\beta p/2}, \quad 2.22$$

where $\sigma_0 = \varepsilon_{33}/d$. Substituting eq. (2.22) in eq. (2.20), the conductance is readily determined:

$$G(\omega) = 4C_s k_{EFF}^2 f_0 \sin^2(k_0ap/2) \left| \frac{\sin(Nk_0p/2)}{\sin(k_0p/2)} \right|^2, \quad 2.23a$$

$$k_{EFF}^2 = \frac{1}{2a} \frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_s(\infty, k_0 d)} \frac{k_{Lamb}^2}{k_0 d}, \quad 2.23b$$

where k_{EFF}^2 is the device coupling, normally defined at $k_0 \approx \beta_c$, $\beta_c = 2\pi/p$ the central wave number. It is to be noted that eq. 23a is consistent with the expression predicted by the equivalent circuit model [48]. In this case however, the equation provides the fundamental relationship between the electrical conductance and the design parameters of the transducer, providing means for optimizations with respect to the effective electromechanical coupling of the transducer

2.3 Finite element analysis of S0 Lamb wave resonance structures

About 5 years after the initial research efforts in this domain [1] another analytical tool became widely accessible owing to the significant

enhancement of the computer power. The finite element method analysis gradually became the first-choice tool in research and development efforts as it provides full description of the problem with minimum level of approximations and yet it may be very fast if used in a smart way. In this section, useful FEM routines are described and demonstrated towards the fast and accurate analysis of the Lamb wave excitation and propagation characteristics. The software package COMSOL have been used for the FEM analysis throughout this thesis. We consider only one IDT period consisting of two electrodes and apply the Floquet-Bloch boundary conditions (see figure 2.11). Accordingly, the left and right edges of the slab are coupled through the equation $U_L = U_R \cdot \exp(i \cdot k_0(1+q)X)$, where $U_{L,R}$ are the left and right displacement vectors, respectively. One aspect of the modeling employs an eigen frequency analysis for determining the Floquet wavenumber dispersion.

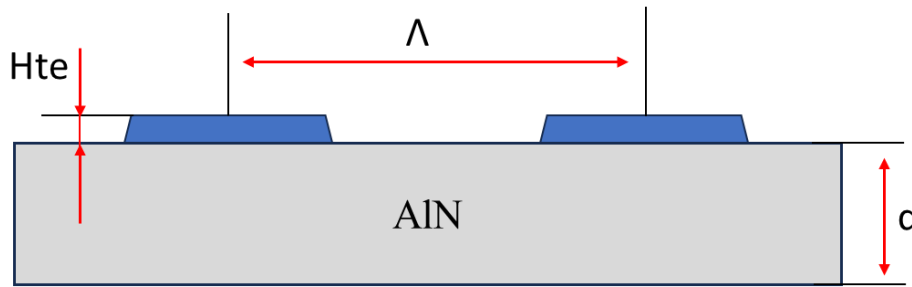


Figure 2.11 Periodic interdigital transducer cell

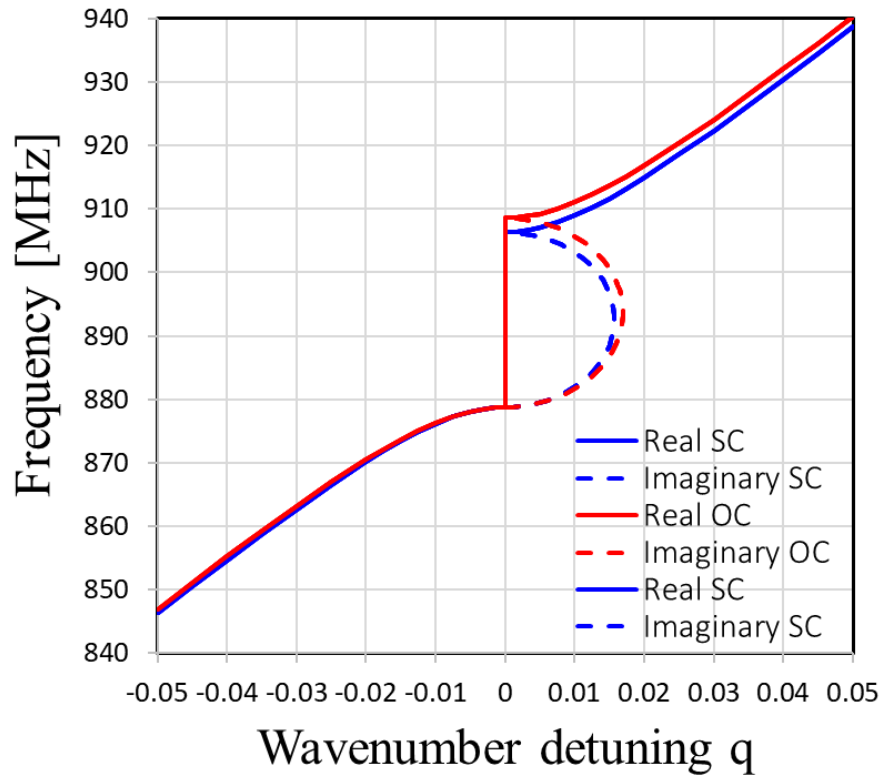


Figure 2.12a Periodic cell analysis of the S0 dispersion characteristics ($q = (\beta - \pi/\Lambda)/(\pi/\Lambda)$) under OC and SC periodic strip configurations

In figure 2.12a S0 Lamb wave dispersion is shown as derived from the eigenfrequency analysis of SC and OC electrodes of the interdigital transducer (IDT). As can be seen both SC and OC analyses reveal a frequency stopband behavior of the S0 wave in very good agreement to the filed analysis described above. The upper stopband edge, in the vicinity of 907MHz, is sensitive to the electrical boundary conditions defining a resonance at 906.37MHz and antiresonance at 908.6MHz. The analysis has been further extended with a frequency response analysis of the periodic cell (see figure 2.12b). Two peaks of the periodic conductance are identified, corresponding to the lower and upper edge of the frequency stopband. The minimum of the admittance defines the antiresonance frequency in excellent agreement to the eigen-frequency analysis of the dispersion characteristics id S0 Lamb wave propagating under OC periodic grating.

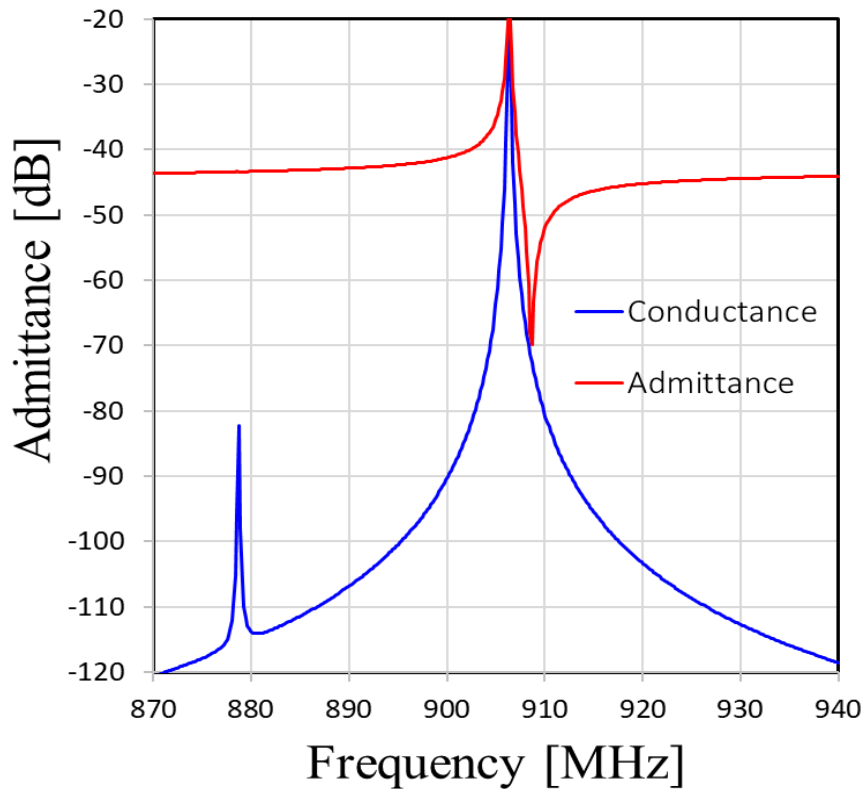


Figure 2.12b FEM simulated S0 periodic admittance

The proposed FEM analyses are further used for the estimation of the electromechanical coupling of the S0 Lamb wave to interdigital transducers of various types (see Fig. 2.19a). In figure 2.19b, the electromechanical couplings of S0 Lamb wave with central wavelength $\lambda=2\Lambda=12\mu\text{m}$ are shown for the four different types of interdigital transducers shown on figure 2.19a. It is evident that the most effective transducer topology is the IDT / IDT topology, reaching electromechanical coupling of up to 4% at relative AlN thickness d/λ near 0.45. This topology is also technologically more difficult to

achieve but feasible with the state of art micro-fabrication techniques [41, 52]. Figure 2.19b also reveals, why S0 Lamb wave resonators are not quite useful for telecommunication filters. In current technology, radio-frequency filtering is required for frequency bands with relative bandwidth of 4% and above, which in turn require electromechanical coupling in excess of 6%. The classical bulk acoustic wave resonator on c-textured AlN membranes have intrinsic electromechanical coupling of about 6% and can be boosted to 7% with design efforts, while the S0 Lamb wave can achieve up to 4% coupling in AlN and is thus always inferior in coupling to the BAW technology employing the same piezoelectric wurtzite material. On the other hand, the single IDT transducer topology is having the lowest coupling but is very easy for fabrication and the coupling is still sufficient for many.

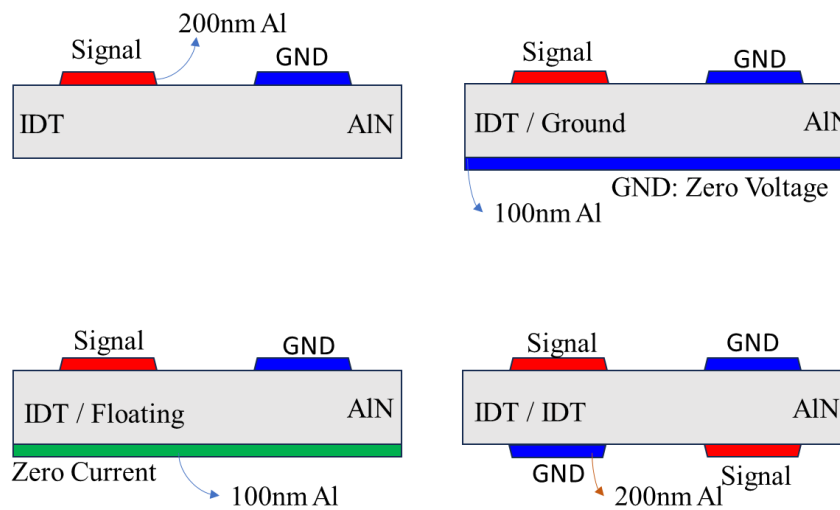


Figure 2.19a periodic cells of different IDT topologies

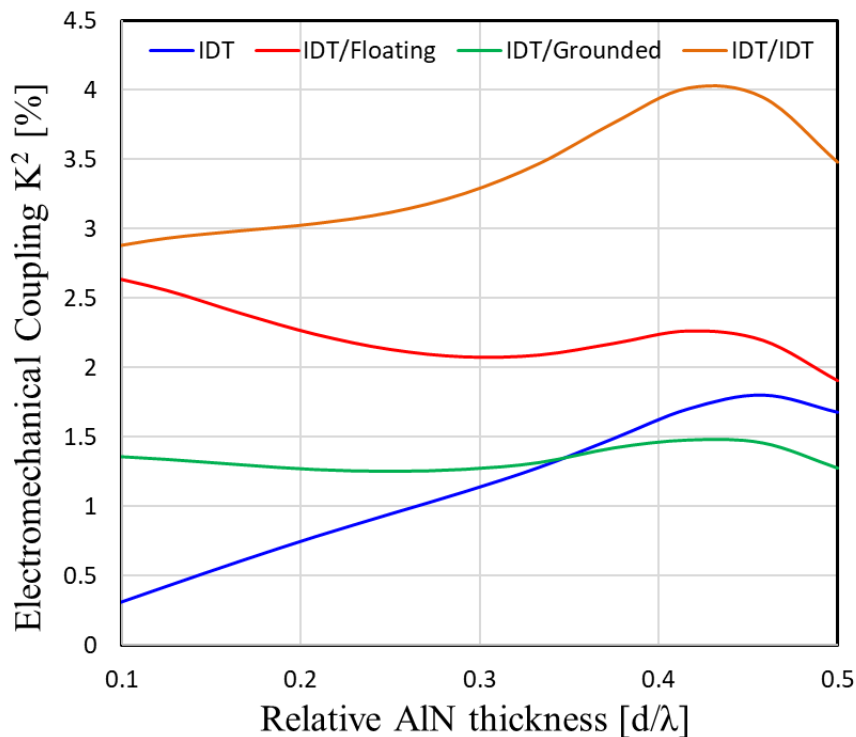


Figure 2.19b S0 Lamb wave excitation under various interdigital transducers

The finite element method analysis was further extended towards the in-plane dispersion characteristics of the S0 Lamb wave. The model represents an eigen-frequency analysis of a 3D periodic cell with applied Floquet-Bloch periodic boundary conditions derived from the limitations imposed by the Snell's law. This has been proven to be an efficient method for the analysis of Lamb waves propagating under oblique angle with respect to the X axis, which in turn provides a preliminary assessment of the wave interactions between the different building blocks of a Lamb wave resonator. Figure 2.20a shows a typical S0 Lamb wave one-port resonator configuration with interdigital transducer having electrodes connected to electrical busbars and distributed grating reflectors placed on both side of the interdigital transducer (IDT). As a minimum we need to consider two 3D primitive cells with IDT electrode and with busbar, respectively. Electrodes of the interdigital transducer and the electric busbar are 200nm thick Al, with mark-to-pitch about $m=0.5$ in the IDT, wavelength $\lambda=12\mu\text{m}$ (IDT grating pitch $\Lambda=6\mu\text{m}$). The base material is $2\mu\text{m}$ thick c-textured AlN platelet (see Fig. 2.20b). The Eigen-frequency analysis allows the use of Floquet-Bloch boundary conditions on both sidewall pairs of the primitive cell, thus enabling the extraction of the dispersion characteristics of both direct-propagating and oblique propagating waves.

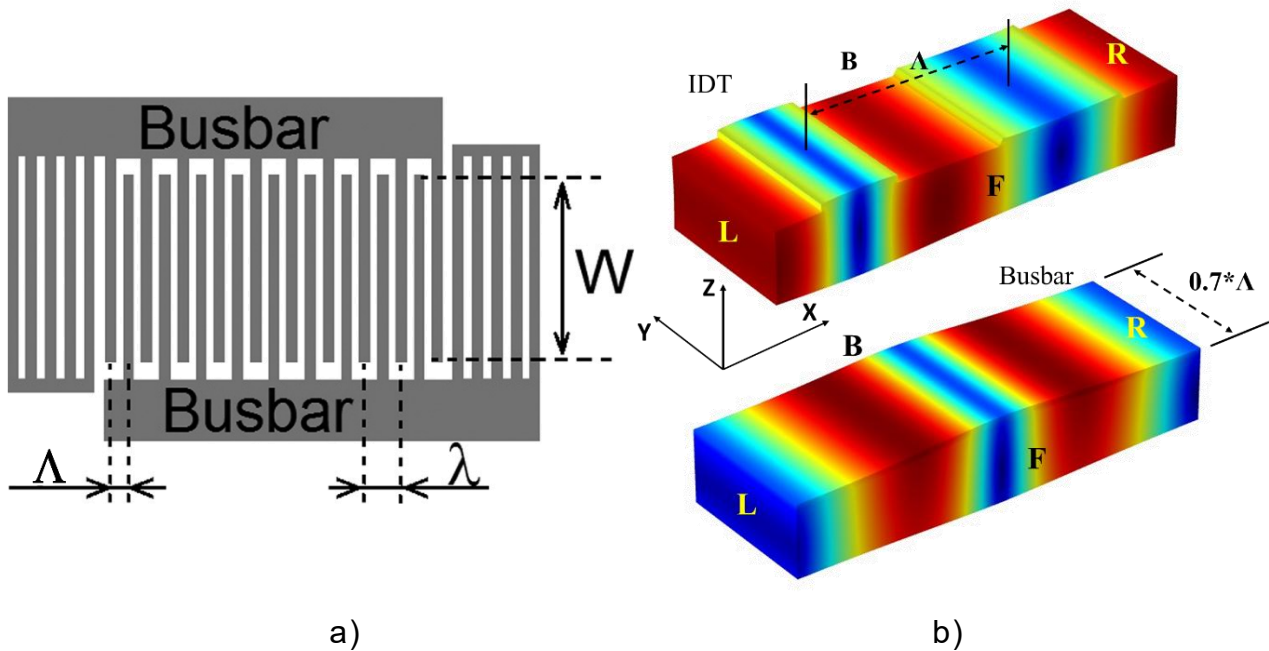


Figure 2.20 Lamb wave topologies a) Lamb wave resonator b) 3D Unit cells

For the determination of the stopband characteristics of the direct-propagating Lamb wave, the oblique angle is set to $\theta=0$ rad, while frequency is determined for each chosen value of q . It is noted that q can be solved for a number of imaginary values, thus also determining the properties in the stop band. The analysis of oblique-propagating Lamb waves is done with respect only to the frequency stopband edges. Accordingly, $q=0$ (i.e the x-component of the wave

vector is set constant π/Λ), while θ is varied in the range up to $\pi/6$ rad. This reduced representation can be used in relation to the Snell's law when comparing propagating Lamb waves under different structures (for example, beneath IDT strips vs dummy fingers or busbars). Finally, both Eigen-frequency analyses can be represented on one figure of the reduced Brillouin zone as follows. On the left-hand side, the frequency of the OX-propagating Lamb wave is plotted as function of the relative wavenumber shift $(\beta - k_0)/k_0 = q$, while, on the right-hand side, the frequency of oblique propagating waves is plotted as function of the relative wavenumber shift $(\beta - k_0)/k_0 = [1 - \cos(\theta)]/\cos(\theta)$. It is to be noted that this presentation is possible, because of the ambiguity of the definition of the sign of the wavenumber. Thus, both the lower and upper branch of the dispersion characteristics for the OX-propagating wave are plotted for $(\beta - k_0)/k_0 \leq 0$, while the oblique propagation characteristics are shown for $(\beta - k_0)/k_0 > 0$. In figure 2.21 the full dispersion characteristics are shown for the S0 Lamb wave under the interdigital transducer and under the electrical busbar.

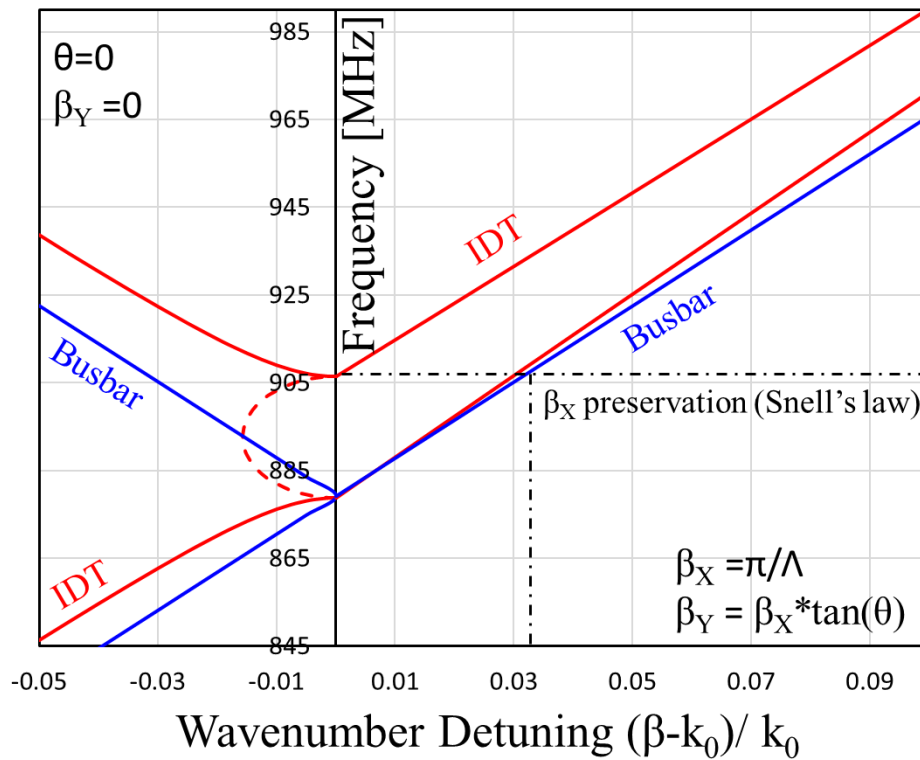


Figure 2.21 Reduced representation of the S0 Lamb wave full dispersion propagating under IDT and busbar regions, respectively. Blue lines are the dispersion curves under the busbar, while red lines and dotted line are dispersion curves under the IDT.

In full agreement to the 2D eigenfrequency analysis, the resonance frequency of the Lamb wave coincides with the upper edge of the stopband, edge of the frequency stopband at about 906.37MHz, while on-set oblique propagation frequency S0 Lamb wave under the electric busbar is at 879.2MHz and according to Snell's law, the wave can couple to propagating

S0 modes in the busbar and thus to lose energy away from the transducer. Note that the Snell's law requires preservation of the wavenumber along OX axis ($k_x = k_0 = \pi/\Lambda$), which is fulfilled in the oblique propagating part of the dispersion characteristics in figure 2.21. This analysis shows the necessity to design the interdigital transducer in a way that limits the mode diffraction and helps the energy confinement.

2.4 The coupling-of-modes (COM) analysis for the design and optimization of S0 Lamb wave devices

This section of the thesis demonstrates the mutual connection between the analytical tools for the analysis of the propagation and excitation characteristics of the Lamb waves with the modeling of real devices. Accordingly, the COM theory broadly used in the design of surface acoustic wave components is adapted to the design of Lamb wave devices. Most generally, COM is a phenomenological model for guided wave propagation and excitation, which is widely employed for the design of high-performance SAW devices. Here we derived important relations between the COM parameters and the physical characteristics of the Lamb waves regarding their propagation and excitation as determined by the analytical tools described above. As a result, we proposed methods for the derivation of the required COM parameters in empirical and analytical manners, respectively. The COM theory is represented by three differential equations as follow [59]:

$$\begin{aligned} \frac{dR(x)}{dx} &= -j\delta R(x) + jk_{21}S(x) + j\alpha V \\ \frac{dS(x)}{dx} &= -jk_{12}R(x) + j\delta S(x) - j\alpha V \quad , \\ \frac{dI(x)}{dx} &= -2j\alpha R(x) - 2j\alpha S(x) + j\omega CV \end{aligned} \quad 2.29$$

where $R(x)$ and $S(x)$ are slowly varying fields describing the amplitudes of the forward and the backward propagating modes, $k_{21} = k_{12}$ is the COM reflectivity parameter, α is the COM transduction coefficient, C is the transducer capacitance per unit length, V is the applied voltage and $\delta = (\omega/v[\omega]) - (\pi/\Lambda) - j\gamma$ is a detuning parameter describing the effects of the unperturbed velocity dispersion and the propagation losses induced by the material viscosity and the wave diffraction. Here ω is the angular frequency, $v[\omega]$ is the dispersive unperturbed velocity, $\Lambda = \lambda_0/2$ is the grating pitch and γ is the acoustic attenuation. For convenience here we present the COM parameters described above in normalized fashion:

- $k_p = -k_{21} \cdot \lambda_0$ —dimensionless reflectivity per finger pair (the same as in eq. 2.28), where k_{21} is the COM reflectivity parameter and $\lambda_0 = 2\Lambda$ is the IDT period;
- v_{S0} - S0 Lamb wave unperturbed velocity in AlN at central frequency $f_0 = v_{S0}/\lambda_0$;

- αn - normalized COM transduction coefficient, $\alpha n = \frac{\alpha \cdot \lambda_0}{\sqrt{W/\lambda_0}}$, where W is the device aperture, and α is the COM transduction coefficient;
- $\gamma_P = \gamma \cdot \lambda_0$ – attenuation per wavelength [Np/ λ];
- D - dimensionless velocity dispersion ($v[\omega] \approx v_{S0}(1 - D \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0})$), which is empirically extracted from $(\omega - \omega_0)/\omega_0 = (1 - D) \cdot (k - k_0)/k_0$, where $D = 1 - v_{GR}/v_{S0}$, $v_{GR} = \partial\omega/\partial k$ is the Lamb wave group velocity and $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ is the wavenumber at central frequency ω_0 ;
- $\widehat{Ct}$ - Normalized Capacitance $\widehat{Ct} = C\lambda_0/W$ [F/m] (per IDT pair, per unit aperture).

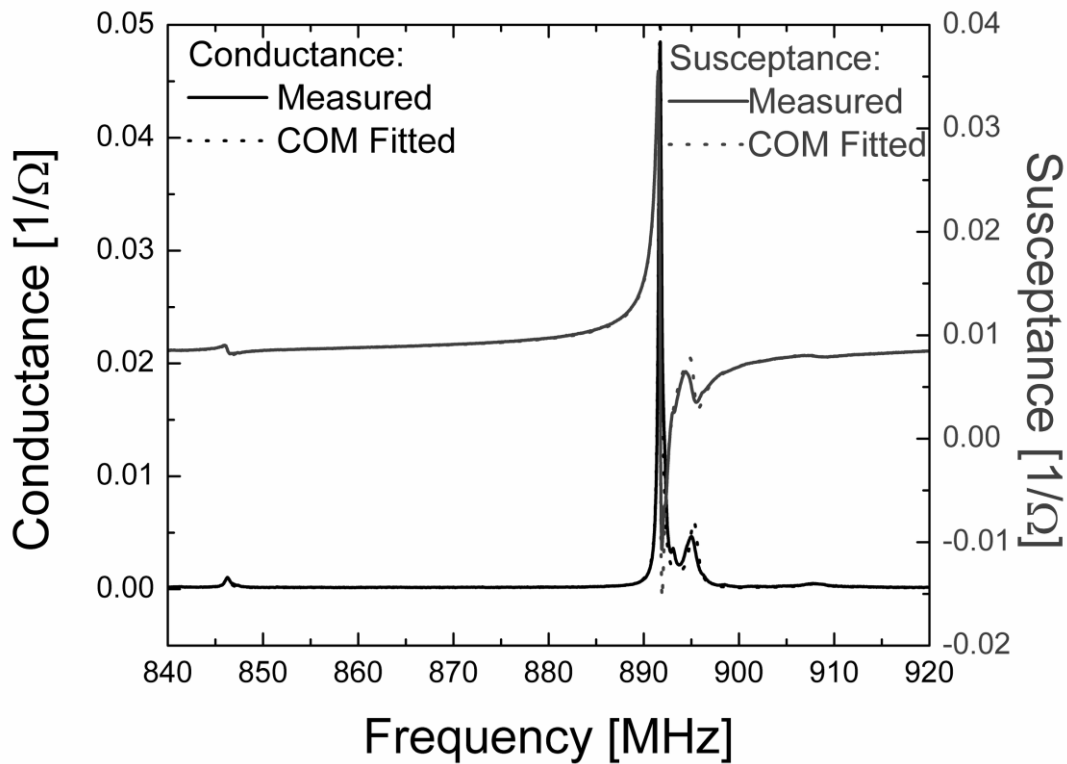


Figure 2.23a Measured vs COM-fitted admittance of a S0 Lamb wave resonator shown in broader frequency band

This parametric model has analytical solution, which enables for rapid design and optimization of the components. Its relevance is demonstrated through COM parameters extraction by fitting a measured S0 Lamb wave resonator admittance. The experimental curve (solid lines) in figure 2.23 is fitted to the COM model (dashed lines) by means of least square fitting. In figure 2.23a results from fitting in a broader frequency band are shown, while in figure 2.23b only results for frequencies in the vicinity of the resonance are shown. As seen, the simulated curve reproduces fairly well the experimental response. Table 2.1 shows the values of the COM parameters extracted from the fitting procedure in figure 2.23a. With these COM

parameters one can design variety of S0 Lamb wave resonance structures employing the same technological platform (layout).

Layout: 2 μ m thick c-AlN, 270nm thick Al electrodes, $\Lambda=6\mu$ m	
COM Parameters:	Value
S0 unperturbed velocity (v_{S0} [m/s])	10435.05
Velocity dispersion (D)	$3.5 \cdot 10^{-2}$
Normalized Reflection Coefficient ($ k_P $)	$16.5 \cdot 10^{-2}$
Normalized Capacitance ($\widehat{Ct}$ [pF/m])	81.9
Normalized Transduction Coefficient (α_n [$\Omega^{-1/2}$])	$13.3 \cdot 10^{-5}$
Attenuation (γ_P [Np/ λ])	$9.48 \cdot 10^{-4}$
Parasitic Electrical Resistance (R_S [Ω])	1.81

Table 2.1 Values of the experimentally extracted COM parameters

CHAPTER 3. Technology and prototyping of AlN based Lamb wave resonator structures

This chapter present a comprehensive overview of the research related to the design, the microfabrication and the characterization of thin-film Lamb wave resonators employing thin-film piezoelectric AlN membranes. The chapter begins with the foundational first demonstration of this type of resonators. The evolution of the design of high-performance Lamb wave resonators is further presented in a complementary manner. These improvements include the increase of the quality factor, the suppression of unwanted parasitic modes in the real structures as well as inherent temperature compensation of the resonance frequency. The core of these research efforts was published in a review paper [23], while being presented as an invited talk at the 2012 IEEE Int. Ultrasonic Symposium. Two main types of resonators were developed. The first type employs distributed reflectors represented by periodic electrode gratings on the surface of a fully clamped AlN membrane, while the second type resonators employ fixed reflector represented by the suspended edges of AlN platelet fixed by tethers.

3.1 The first thin-film Lamb wave resonator prototypes [1],[40]

The fabricated device geometry is shown on figure 3.2, while the specific design parameters are summarized in Table 3.1. The device has been fabricated on a micromachined free-standing AlN membrane. As a supporting substrate (111) oriented low resistive (10 Ω .cm) 4-in Si wafer has been used. After cleaning the substrate, a 200 nm thick aluminum (Al) film is deposited by sputtering and then patterned. Subsequently 2 μ m thick AlN film is deposited by reactive sputtering onto the bottom electrodes using a Von Ardenne reactive balanced magnetron sputter deposition system operated in a pulsed direct current (DC) mode. Contact via-holes through the

AlN film are subsequently dry etched by reactive ion etching. The top Al electrodes are then deposited with thickness equal to that of the bottom electrodes. The Lamb wave devices are acoustically isolated from the supporting Si substrate by etching the Si substrate from the backside using a three-step dry etch Bosch process. The deposition of a 2 μm thick c-textured AlN film having a 2° full width at half maximum of the (002) rocking curve was made without external heating. After loading the wafer into the chamber, the system was pumped down to base pressure below 5×10^{-8} Torr. The 6-in. Al target is then pre-sputtered in an Ar environment for 15 min. and additionally for 5 min. in an Ar/N₂ atmosphere. The distance between the target and the substrate holder is 55 mm.

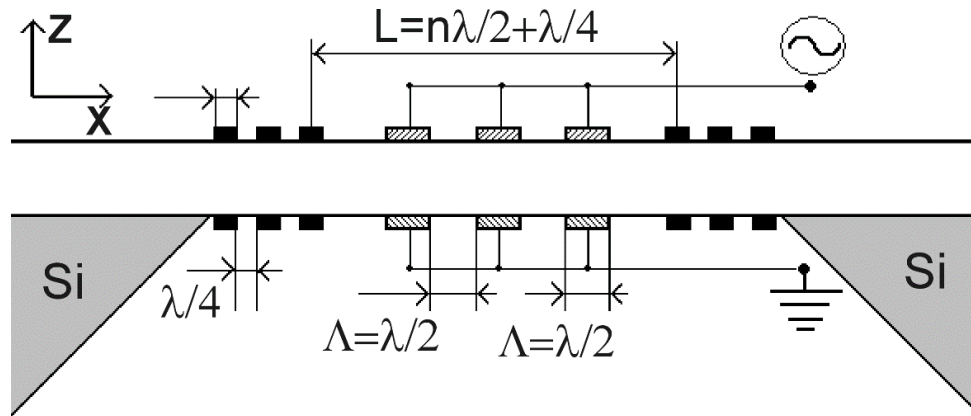


Figure 3.2. Topology of the lateral field excited Lamb wave resonator.

Membrane Thickness d	2 μm
Device Aperture W	350 μm
Acoustic Wavelength λ	18 μm
Strip width in the reflectors $\lambda/4$	4.5 μm
Strip width in the transducer $\lambda/2$	9 μm
Strip width to period ratio	0.5
Cavity length L	553.5 μm
Number of strips in the reflectors	16
Number of LFE transducers	30

Table 3.1 Design parameters of the lateral field excited Lamb wave resonator

Figure 3.3 shows the “measured” frequency response for the Lamb resonator admittance. Clearly the Lamb wave exhibits a very high velocity of propagation of around 10300 m/s at resonance frequency, the device Q is 880 yielding a figure of merit $Qxf = 0.5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$, which is very close to that achieved with high velocity SAW resonators in AlN/Diamond/Si layered structures [14]. The effective device coupling is, $K_{EFF}^2 = \frac{0.25\pi^2(F_A - F_R)}{F_R} = 0.8\%$ where F_R and F_A are the frequencies at the resonance and antiresonance, respectively.

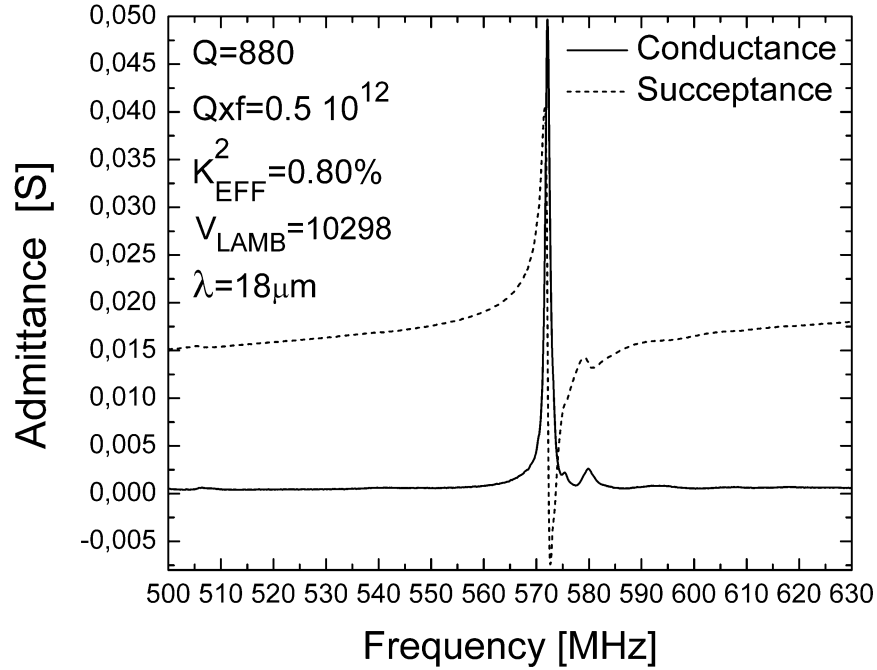


Figure 3.3 Measured frequency response of the S0 Lamb wave resonator.

3.2 High performance S0 Lamb wave resonators

A second-generation thin-film Lamb wave resonators were developed upon improvements in the microfabrication technology and the design. These resonators were designed with various transduction topologies. In figure 3.11 a microscope image of the IDT-based Lamb wave resonator is shown as fabricated. In the figure we use the abbreviation FPAR which stands for the thin film plate acoustic wave resonator, which is descriptive for the geometry, while not specific for the mode of excitation. Depending on the piezoelectric material, this mode can be either from the Lamb wave family or from the shear plate guided wave family. In all cases however, the mode is always waveguided in the thin piezoelectric membrane. In figure 3.12 a microscope image of the lateral field excited Lamb wave resonator employing an array of longitudinal wave (LW) transducing strips is shown as fabricated. This type of thin-film Lamb wave resonator requires additional technological routines towards the formation of the bottom electrode and its connection to the ground pads on the top surface. Both resonators employ distributed reflectors in the form of periodic electrode gratings with $\lambda/2$ pitch, formed on the thin AlN membrane. The fabricated devices were measured and their performance analyzed. In figure 3.15, the close to resonance frequency response of the synchronous IDT-based Lamb wave resonator, shown as fabricated on figure 3. 11, is shown. The existence of a stopband having a lower stopband edge situated at $F_L = 850.19$ MHz, and upper stopband edge at $F_U = 889.67$ MHz is clearly seen. These yield a COM

reflection parameter $k_p \approx -0.145$, which is a value very close to the theoretically predicted for this case $|k_p| = 0.157$, where $k_0 = \pi/\lambda$.

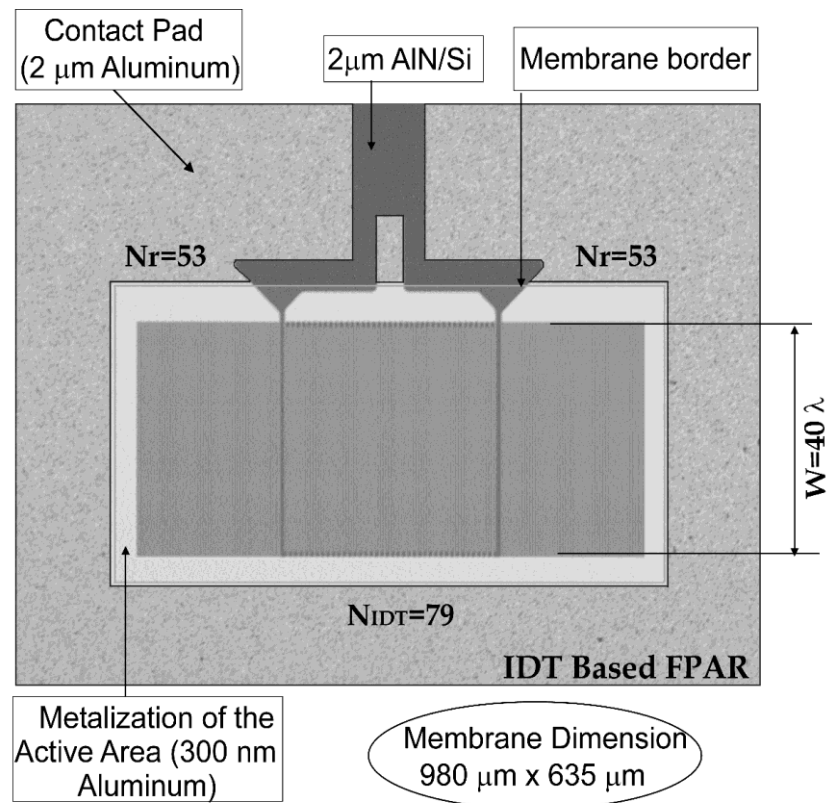


Figure 3.11 Top view of the fabricated IDT-based Lamb wave resonator.

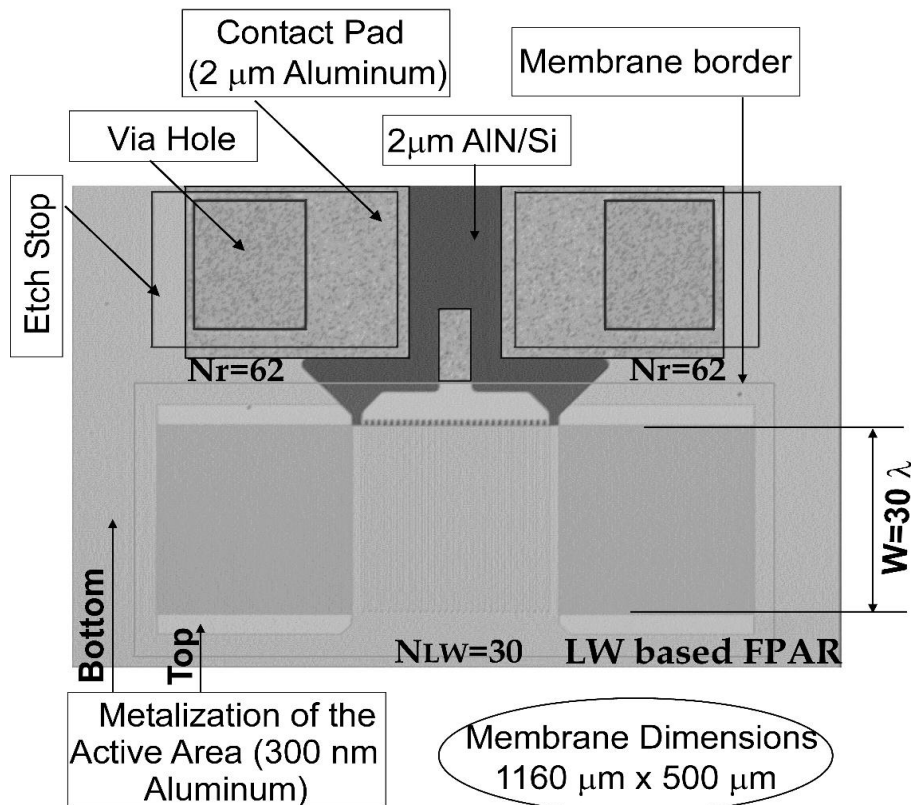


Figure 3.12 Top view of the fabricated lateral field excited Lamb wave resonator.

The acoustic wave velocity is defined at the center of the frequency stopband as $v_{S0} = 10440$ m/s. The effective coupling K_{EFF}^2 determined by positions of the resonance and antiresonance frequencies is 0.34%, which is a value close to the measured one in the first S0 Lamb wave resonator prototype employing an interdigital transducer (IDT). The device quality factor reaches 1860, while some asynchronous designs demonstrated Q factors of up to 3100 at resonance frequency of 890 MHz.

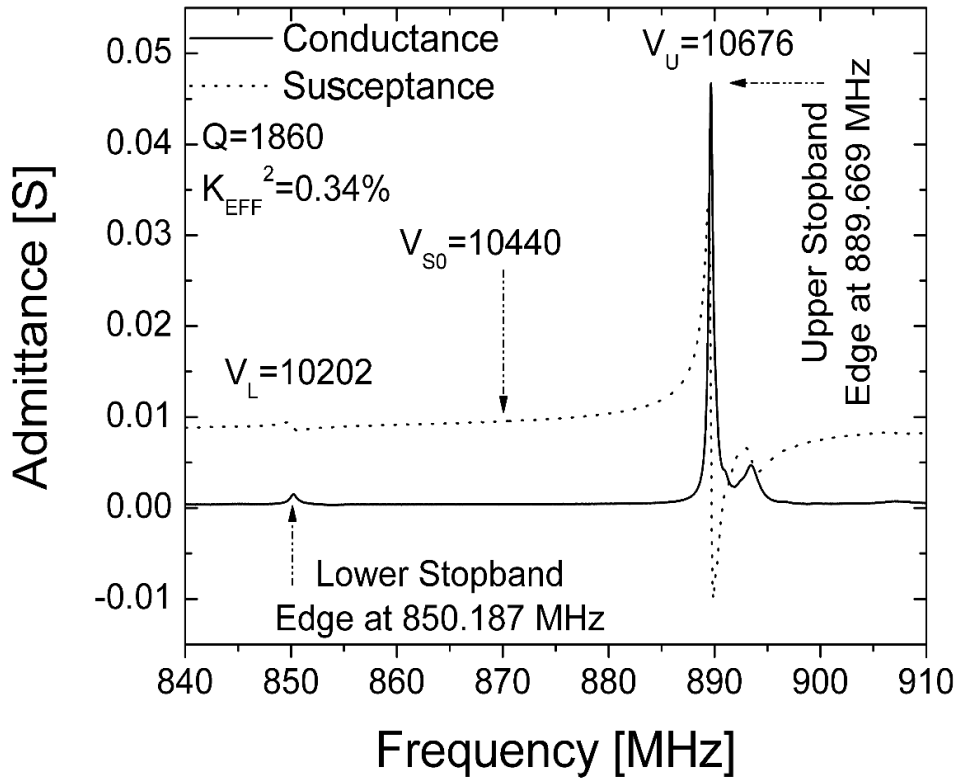


Figure 3.15 Measured frequency response of the IDT based Lamb wave resonator.

In figure 3.20 the close-to-resonance characteristics of the lateral field excited Lamb wave resonator employing a comb transducer for longitudinal wave excitation (see figure 3.9c) for different distances between the reflectors are shown. These structures consist of two gratings with different periodicity (pitch $6\ \mu\text{m}$ in the reflectors and $12\ \mu\text{m}$ in the transducer) and exhibit a more complex behavior. All the resonance peaks observed lie inside the reflector's stopband situated in the 833.135 MHz to 862.367 MHz frequency range. The highest observed loaded $Q = 2580$ belongs to the device operating closest to the reflector's stopband center in which the reflection coefficient expectedly reaches its maximum.

This second iteration has been initially presented in 2005 at the Int. IEEE Ultrasonic Symposium [2] and its full version published in journal with impact factor [60]. Further insights to the device design were reached with a third iteration of S0 Lamb wave resonator design [74]. Finally, a novel Lamb wave resonator with double busbar topology aiming at transverse mode suppression was proposed (see figure 3.46b) and experimentally verified.

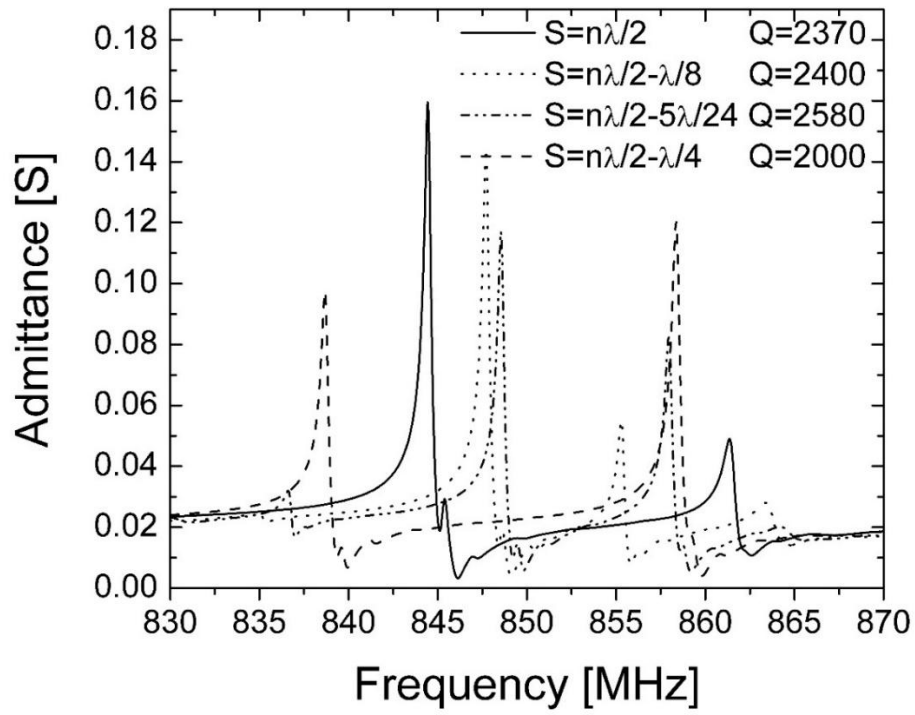


Figure 3.20 Close-in resonance characteristics of the S0 Lamb resonator with comb transducer and different synchronizations of the reflectors.

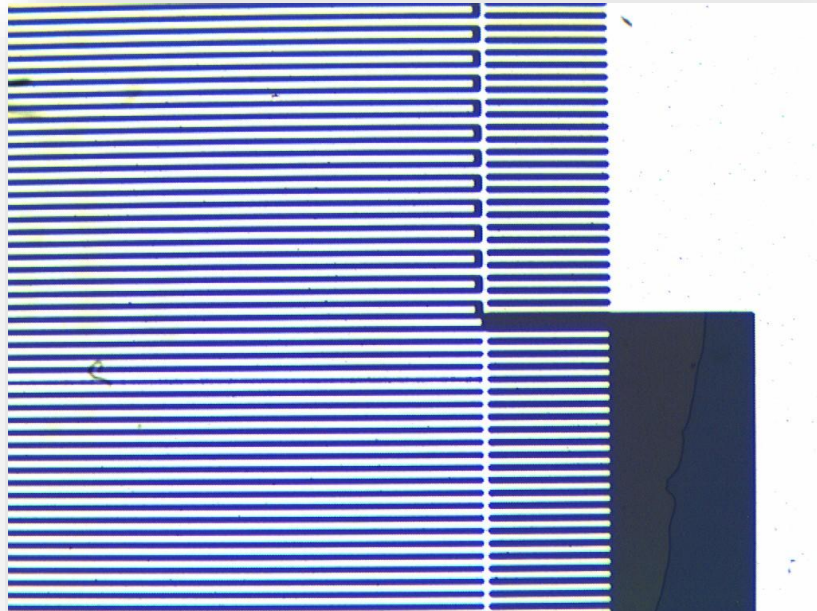


Figure 3.46b. Top view of the tested resonators with modified (double) busbar as fabricated

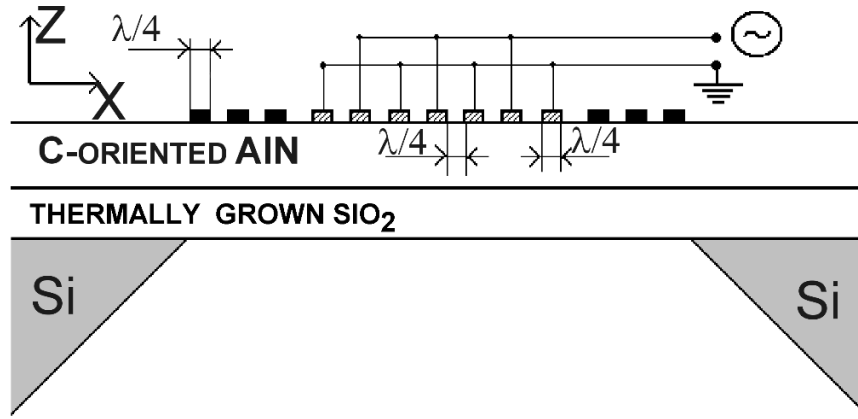


Figure 3.51 Topology of the thermally compensated S0 Lamb wave resonator

Subsequently, temperature compensation of S0 Lamb wave resonators utilizing distributed reflectors is studied in detail and optimized designs demonstrated [83]. The thermally compensated Lamb wave resonator resembles the topologies presented above, while being structured over a composite membrane (see figure 3.51). Accordingly, both the reflectors and the transducer are realized by periodical strip configurations.

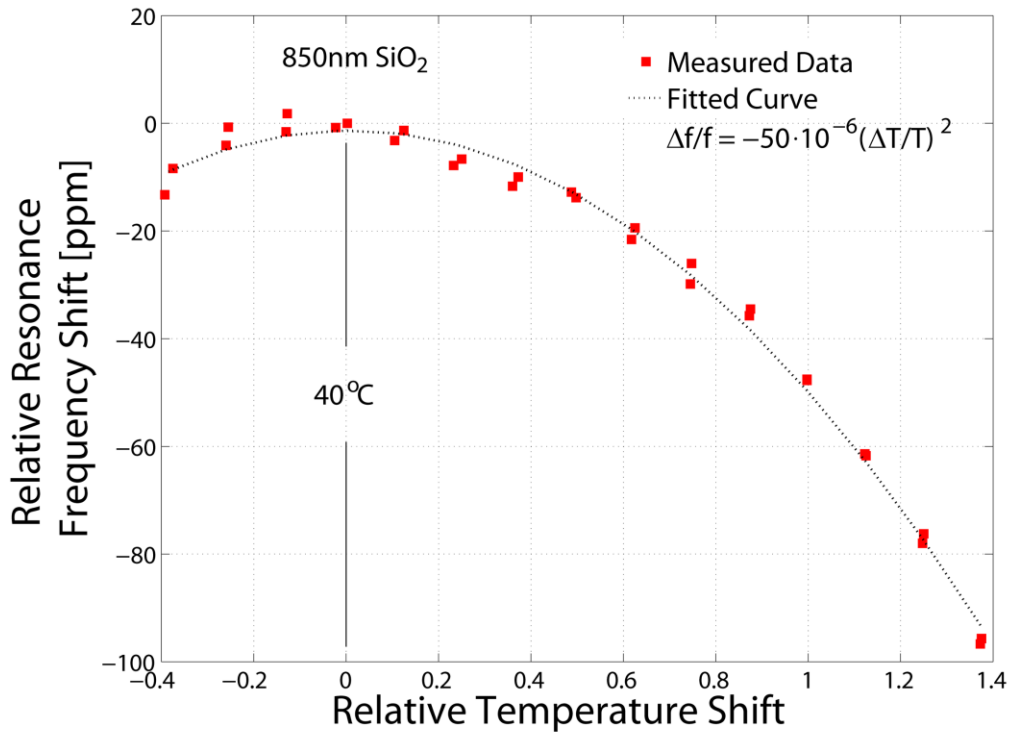


Figure 3.64 Relative resonance frequency shift around 40°C for a temperature-compensated synchronous device measured during heating and cooling in the temperature range of 25°C –95°C.

The temperature coefficient of frequency for the non-compensated S0 Lamb wave resonator has been measured in the range -20 ppm K^{-1} to -25 ppm K^{-1} . The temperature compensation is achieved for a SiO_2 thickness $d_{\text{SiO}_2} = 850 \text{ nm}$ (see figure 3.51), corresponding to $d_{\text{SiO}_2}/\lambda = 0.07$. Hence the experiment demonstrates temperature compensation in AlN/SiO_2 with

relative thicknesses $d_{\text{AlN}}/\lambda = 0.1667$ and $d_{\text{SiO}_2}/\lambda = 0.07$, respectively. This result is in an excellent agreement with the theoretical predictions. In figure 3.64 the temperature dependence of the frequency is studied in greater detail for the temperature-compensated device. Complete temperature compensation was observed at 40°C. The actual temperature dependence of this device exhibits a parabolic dependence which was fitted. From this fit, the second order temperature coefficient of frequency is found to be $\beta = -31 \text{ ppb/K}^2$. For comparison, the second-order temperature coefficient of frequency demonstrated here is larger than that for the temperature-compensated AlN thin film bulk acoustic resonator (FBAR) ($\beta = -20 \text{ ppb/K}^2$) [86] but smaller than that for surface acoustic wave (SAW) on ST-cut quartz ($\beta = -34 \text{ ppb/K}^2$) [87].

Further presented here are thin-film Lamb wave resonators with tether supports which employ fixed reflectors represented by the suspended edges of the thin-film platelet. In this work [51], we have microfabricated suspended edge S0 Lamb wave resonators. The technology of this type of devices requires precise etching of the AlN membrane with ability to achieve smooth and vertical suspended edges of the AlN membrane. Accordingly, we have made a specific choice for the electrode material (Pt in this case) unlike the use of Al electrodes in the fully clamped S0 Lamb wave resonators. In figure 3.67 an edge type Lamb wave resonator is shown as fabricated employing the fabrication routine described above. Further shown are the tethers and the reflection edges of the device. The device employs an interdigital transducer for excitation the S0 Lamb wave. Within the same fabrication batch, we fabricated three types of test resonators employing different excitation topologies including grounded and electrically floating continuous bottom electrode.

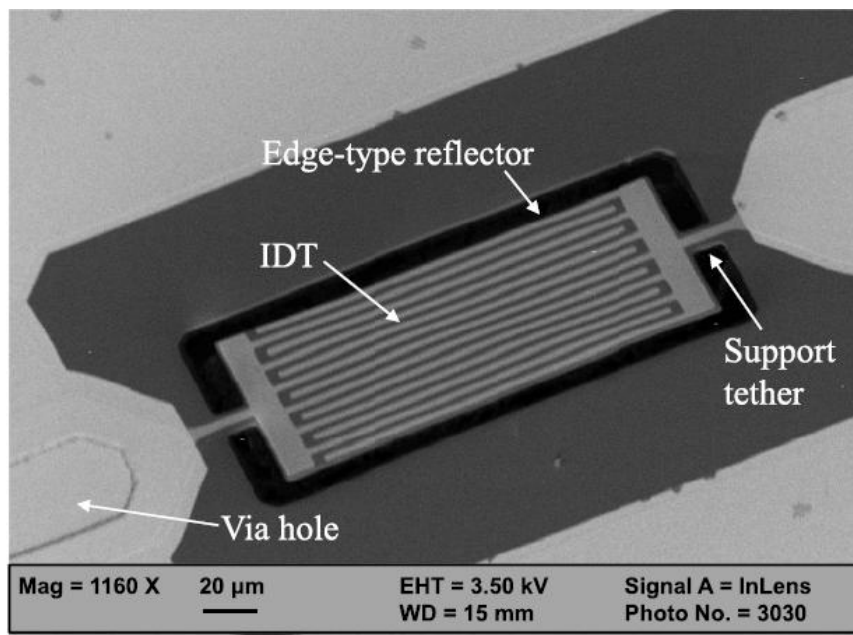


Figure 3.67 Scanning electron microscope (SEM) image of an edge-type AlN Lamb wave resonator with the grounded bottom electrode.

In figure 3.70 the measured admittance of resonator employing IDT/electrically open bottom surface is shown fitted with the Butterworth-Van Dyke (BVD) model. It makes impression the fairly large parasitic resistance of 30 Ohms which is partially due to the resistance of the IDT electrodes but also to the resistance of the narrow contact through the supporting tether. Static device capacitance of 102fF is extracted, which has great contribution from the test fixture. As a result, the measured effective coupling is about 0.18%, which is significantly smaller than the 0.5% expected in this case. The device Q factor reached 3000, which is comparable to the one measured in the fully clamped S0 Lamb wave resonator prototypes. The use of Pt electrodes determines a marginally larger temperature coefficient of the resonance frequency of about -26 ppm/K.

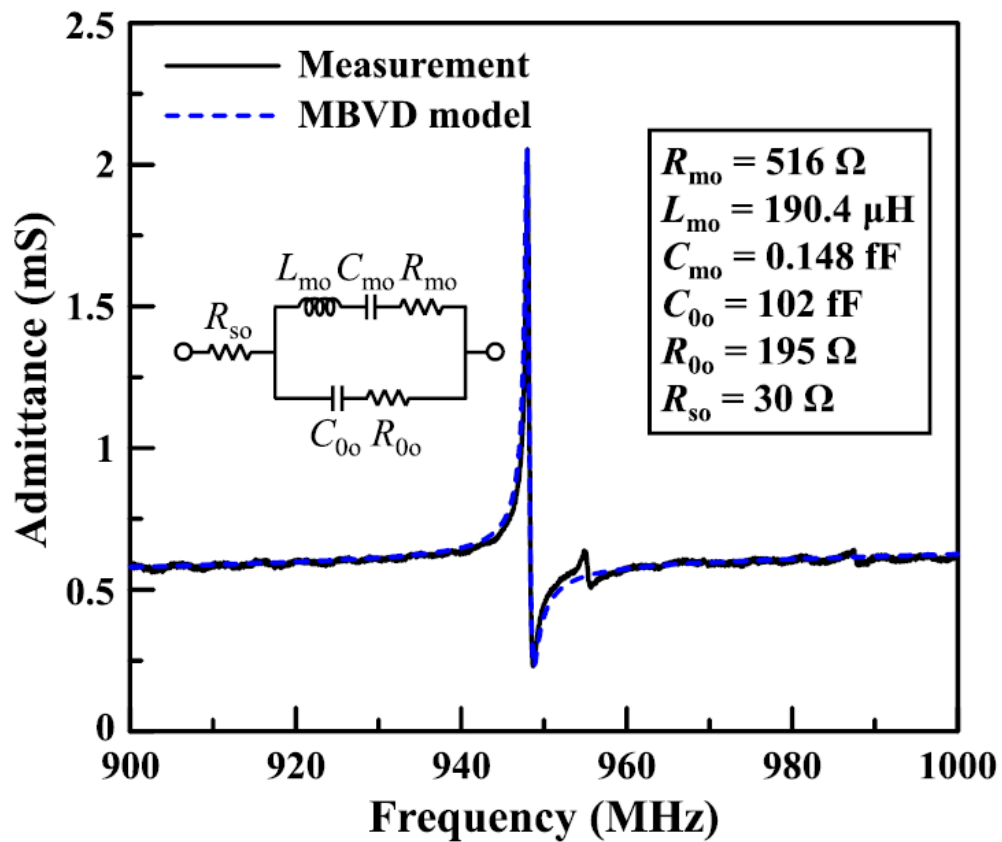


Figure 3.70 Close-up view of the frequency spectra of the resonator with electrically open bottom surface of the AlN

3.3 S0-A1 intermode coupled Lamb wave resonators [96]

This section presents an entirely new concept for the design of acoustic resonance structures and devices. The concept used employs the interaction of two different modes assisted by the perturbing effect of a periodic electrode grating. More specifically, the S0 Lamb wave interacts with the A1 Lamb wave near its cut-off frequency. In this way the S0 mode transfers its energy into the fundamental thickness shear plate resonance. The base requirement for this interaction is that the pitch of the grating equals the S0 wavelength at a frequency in the vicinity of the fundamental thickness shear wave resonance of the platelet. This interaction is illustrated in figure 3.73.

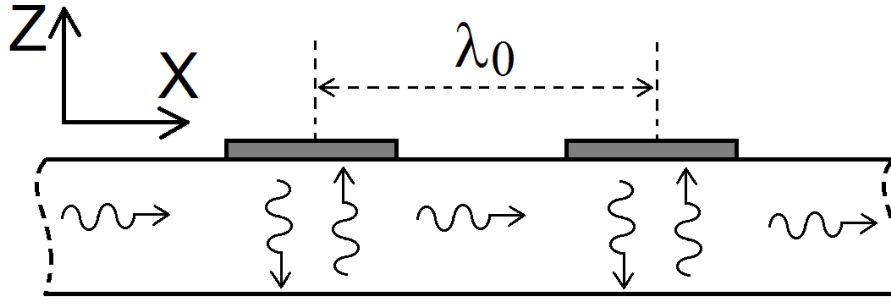


Figure 3.73 An inter-mode grating coupler

More detailed description of this interaction is reached by finite element method based eigen-frequency analysis. Figure 3.76 shows the dispersion characteristics of the grating assisted inter-mode coupling as simulated.

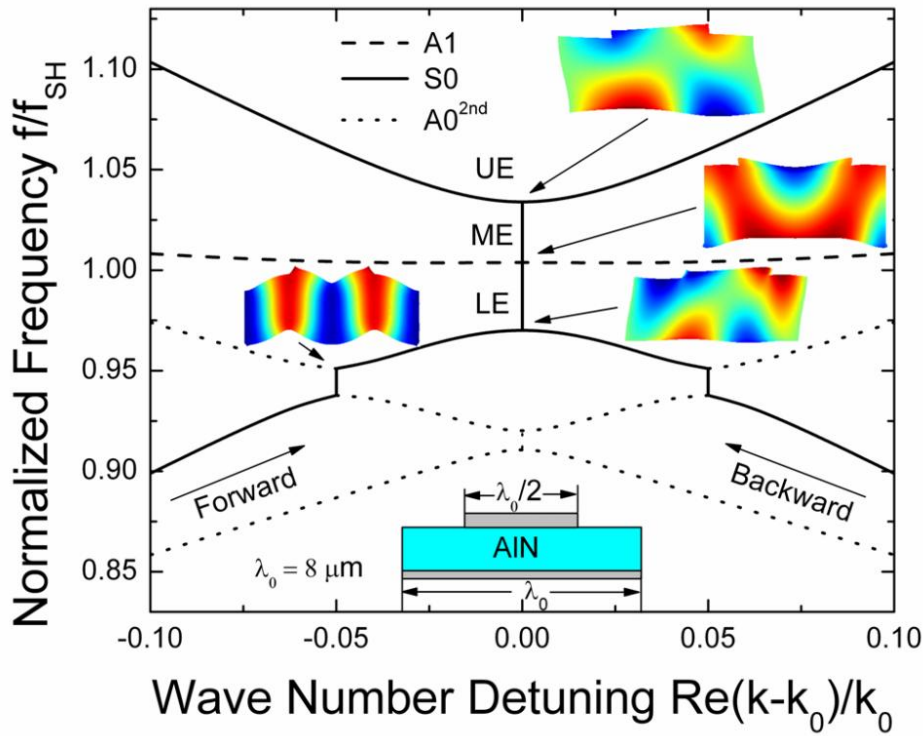


Figure 3.76 Close to resonance dispersion characteristics. $F_{SH}=1.291\text{GHz}$ has been determined by eigen-frequency FEM analysis.

Three fundamental stopbands are identified as follows. The lowest frequency stopband located in the vicinity of the central wavenumber $k=k_0$ is associated with a weak reflection of the 2nd harmonic of the lowest order asymmetric Lamb wave (A0) from the grating strips. This wave cannot be electrically excited since even harmonics cannot couple to LW transducers. At a slightly higher frequency a second stopband slightly deviating from the central wavenumber is observed. This stopband is associated with an inter-mode coupling between the S0 mode and the 2nd lateral harmonic A0 mode propagating in opposite directions. The third frequency stopband, located also in the vicinity of the central wavenumber, is associated with the coupling

between the S0 mode and the fundamental shear resonance. This is the widest stopband in the diagram suggesting that the interaction between the S0 mode and the fundamental shear plate bulk resonance is the strongest. Unlike the conventional frequency stopbands in SAW and Lamb wave devices, here the resonance appears in the middle of the frequency stopband, while the lower and upper edges of the frequency stopbands remain weakly coupled to the transducer.

The periodical cell shown in figure 3.76 represents part of a periodic array (with pitch equal to λ_0) of longitudinal wave transducers for S0 Lab wave excitation in the AlN platelet. This fact makes possible the design of a resonator with intermodal S0-A1 coupling in which the the transducer is also a refractor of the S0 and A1 acoustic modes. In addition, piezoelectrically passive refractors can be introduced on both sides of the transducer to further confine the energy. This type of resonator employing a fully clamped AlNM membrane with Al electrodes was designed, fabricated and characterized. Figure 3.78 shows the measured near resonance frequency response of the inter-mode coupled resonator admittance. In the same figure, a micrograph of the fabricated thin film resonator is also shown. The three stopband edges are clearly identified as indicated in Figure 3.78.

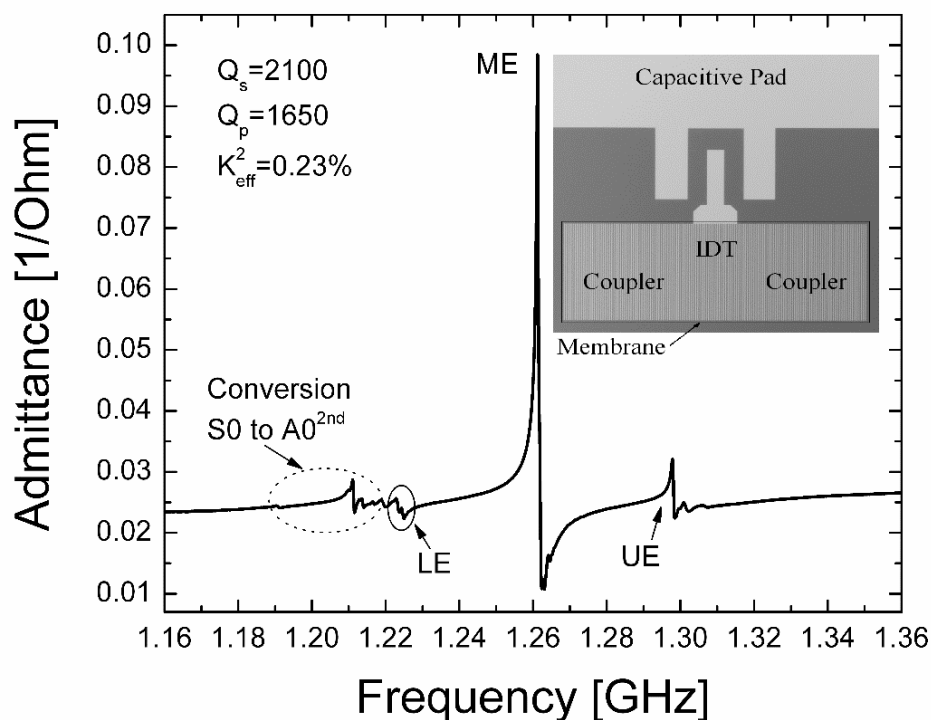


Figure 3.78. Measured close-to-resonance frequency response of the inter-mode coupled thin film resonator

Clearly, the main resonance coincides with the middle edge of the frequency stopband. The quality factors at resonance F_R and antiresonance F_A resonances are $Q_R=2100$ and $Q_A=1650$, respectively. The effective

device coupling is $K_{EFF}^2=0.23\%$. It is further noted that the measured device coupling is significantly lower than the theoretically calculated value of 0.66%. This is due to the capacitive coupling between the signal contact pad and the continuous bottom electrode which electrically represents a large parasitic capacitance connected in parallel with the resonator.

3.4 Zero-group velocity S1 Lamb wave resonator [98, 99]

This section of the thesis presents a principally new type of resonance device which does not require additional reflective building blocks for energy confinement. Instead, it employs the zero-group velocity which characteristic for the S1 Lamb wave dispersion for a specific ratio between the acoustic wavelength and the free-standing membrane thickness. The specific zero-group-velocity resonator geometry is shown in figure 3.80 along with the expected wave deformation at resonance, calculated by means of a frequency response finite element analysis (COMSOL). Here split $\lambda_0/8$ (λ_0 is the acoustic wavelength at central frequency) electrode IDT is used as a non-reflective transducer. The ZGV mode is excited under the IDT and does not exhibit any reflections. It is further to note that the ZGV resonator consist of two regions: the metalized (under the IDT) and the outside. These two regions exhibit slightly different depression characteristics. The principle of energy confinement under the metalized region, states that the lowest frequency $f_{D,O}$ of the outside region must be higher than the lowest frequency $f_{D,A}$ of the active region. Here the lowest frequency in each region is defined as the frequency below which the S1 is non-propagating (i.e real solution for the lateral wavenumber does not exist). The energy confinement is readily accomplished by the ZGVR configuration in figure 3.80 due to the mass loading effect of the IDT grating. The frequency response analysis of the proposed structure proves the inherent energy confinement under the transducer (see figure 3.82 below).

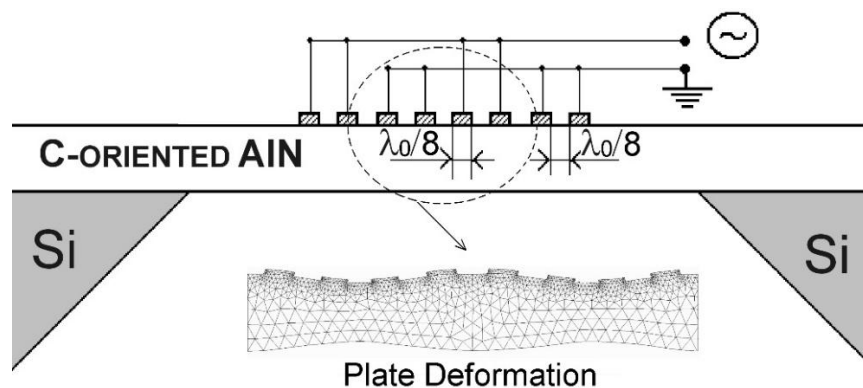


Figure 3.80. Topology of the AlN zero-group-velocity resonator

The same device has also been fabricated on a micromachined free standing AlN membrane. The fabricated device was measured with RF pico-probe supported vector network analyzer (VNA). The wideband frequency response measurement for the ZGVR admittance is shown in figure 3.83. In

the same figure the actual ZGV resonator as fabricated is also shown. The resonator exhibits acoustic responses corresponding to the lowest order asymmetric Lamb wave (at 467 MHz), the Lowest order symmetric Lamb wave (at 1.255 GHz) as well as the first order symmetric S1 ZGV Lamb wave (at 1.985 GHz), respectively. Their phase velocities are further identified. Note, that all modes except the ZGV mode have non resonant behavior due to the non-reflective IDT design. Clearly, the zero-group-velocity mode exhibits a very high phase velocity of propagation of around 17460 m/s, quality factors at resonance and antiresonances are $Q_R=600$ and $Q_A=700$, respectively. The effective device coupling is 0.65%.

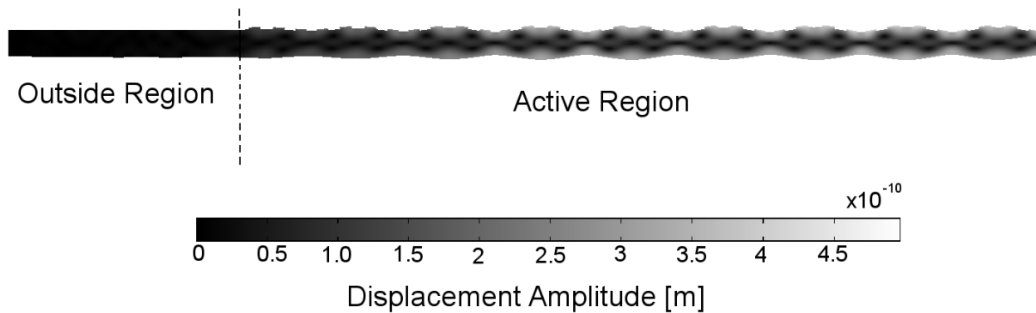


Figure 3.82. Energy confinement under the IDT region

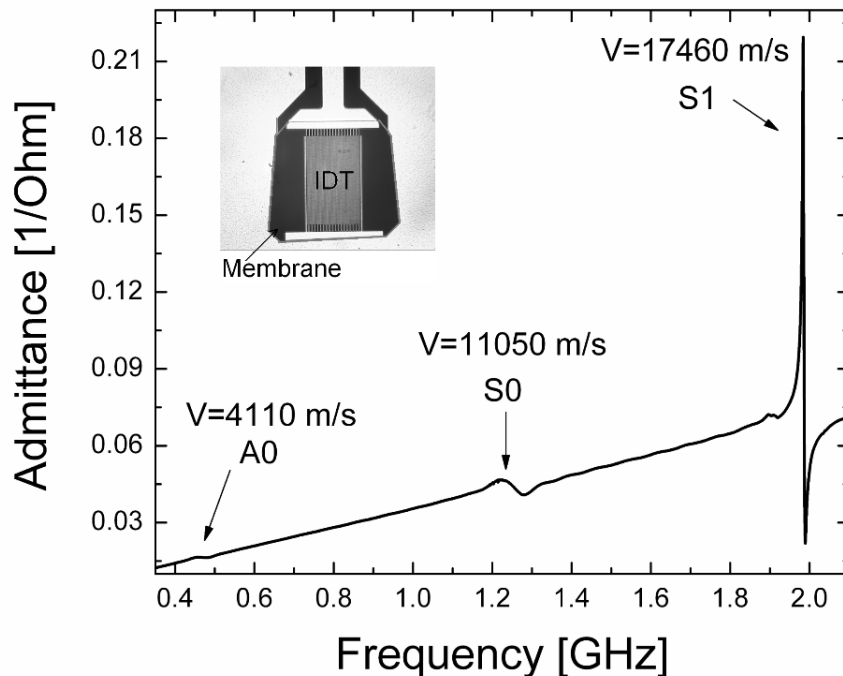


Figure 3.83. Measured wide span frequency response of the zero-group-velocity resonator

Additional theoretical research predicted further improvement in the energy confinement by means of small number of guarding non-reflective and electrically grounded electrodes. These electrodes reduce the end

effects in the interdigital transducer which often convert the Lamb mode to lower order modes in the platelet owing to the jump in acoustic impedance at the IDT ends.

Chapter 4. S0 LAMB WAVE RESONATORS IN FREQUENCY CONTROL AND SENSING APPLICATIONS

4.1 An IC compatible power oscillator [121, 122]

Initially, the thin-film S0 Lamb wave resonators were studied as frequency defining components withing an oscillator circuit. We designed and fabricated discrete Si chips with a two-port S0 Lamb wave resonator as shown in figure 4.2. The broadband frequency and phase of one of the synchronous resonators used in this study are shown in figure 4.3.

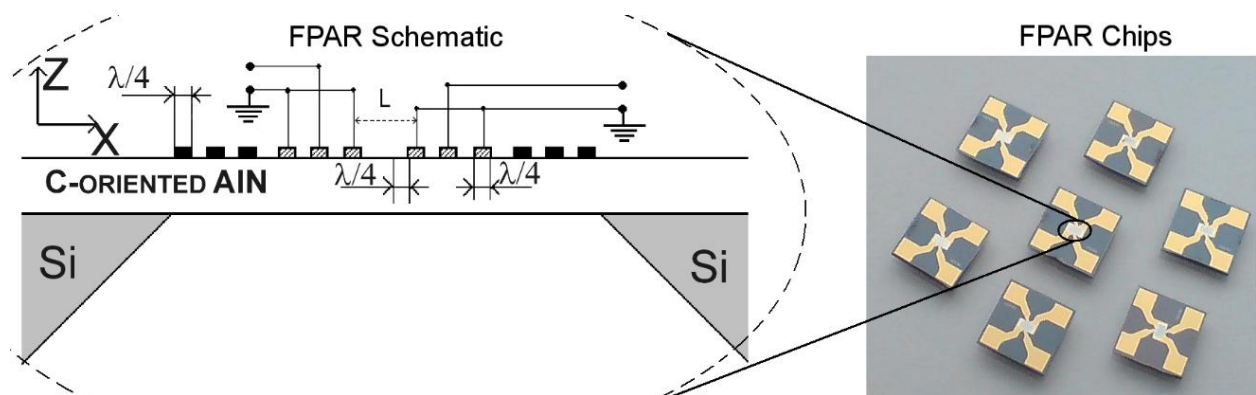


Figure 4.2 S0 Lamb wave device schematic. FPAR stands for thin film plate acoustic wave resonator

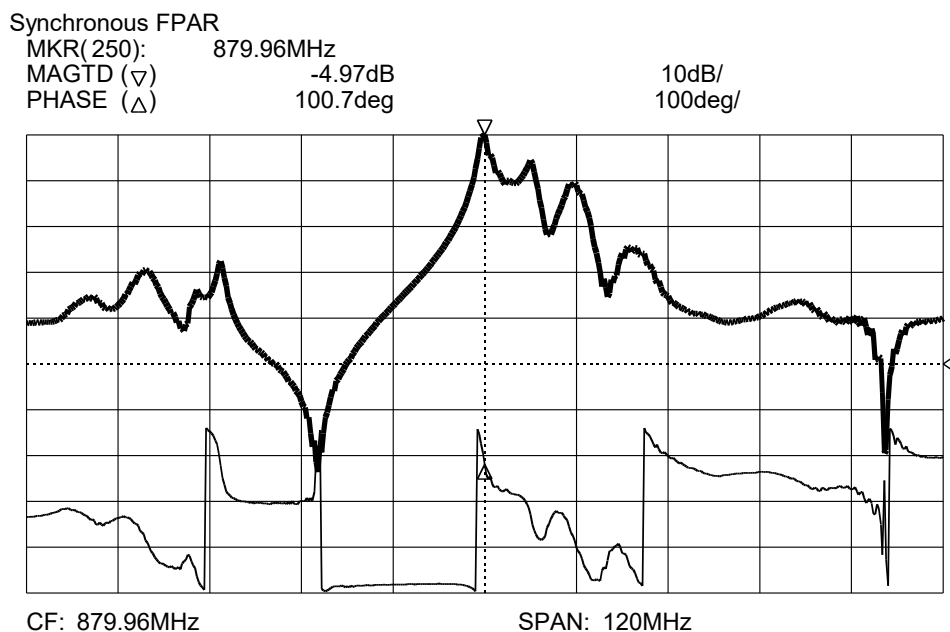


Figure 4.3 Broadband frequency and phase responses of a 880 MHz S0 Lamb wave resonator chip

The S0 Lamb wave resonator chips in figure 4.1 demonstrated a minimum insertion loss of 5 dB and a fairly low loaded Q_L of 720 calculated as

$Q_L = \pi F_0 \tau_g$, where $\tau_g = 259\text{ ns}$ is the group delay value at the minimum loss frequency $F_0 = 880\text{ MHz}$. To test the power handling ability of the S0 Lamb wave resonator chip, a device from figure 4.2 was connected to a power oscillator loop as shown in figure 4.5. A broadband modular UTO-1023 power amplifier, capable of generating 0.5W of RF power at 1 GHz was used as sustaining amplifier in the loop. Except for its high power, this amplifier is also known for its extremely low residual $1/f$ noise, measured as -140 dBc/Hz at 1 Hz carrier offset in this frequency range [124].

In this experiment, the S0 Lamb wave resonator chip was run at 24 dBm (250 mW) at F_0 for 5 days. No measurable performance degradation or departure from the data in figures 4.3 was observed after the power handling test indicating that the 2-port S0 Lamb wave resonator is probably capable of standing even much higher power levels if the amplifier can provide them.

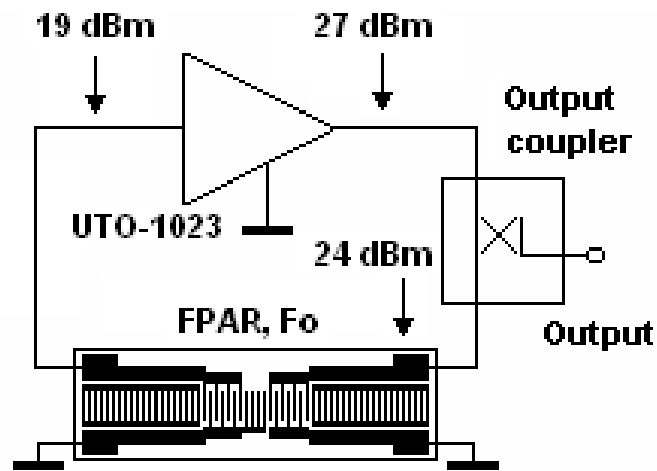


Figure 4.5 Block and level diagram of the S0 Lamb wave stabilized oscillator

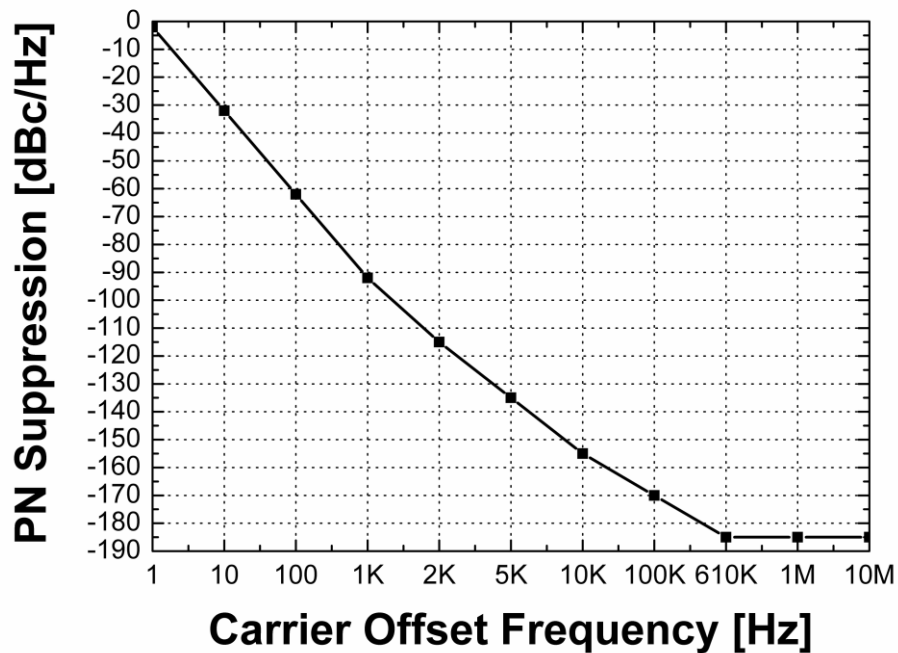


Figure 4.8 Estimated phase noise performance of the S0 Lamb wave resonator based power oscillator from figure 4.5

Despite the low loaded Q_L of the S0 Lamb wave resonator, the oscillator from figure 4.5 was found to provide remarkable phase noise performance, as evident by the single-side-band noise spectrum measured in the signal-to-noise (S/N) ratio mode of the SA. This measurement allows reading a few data points directly from the noise plot and then making a rough estimate of the overall phase noise performance by taking into account that the close to carrier phase noise follows a 30 dB/decade slope. The thermal noise floor (TNF) is calculated as:

$$\text{TNF} = -174 - P_0 + \text{NF} + G, \quad 4.1$$

where $P_0 = 27$ dBm is the loop power (see figure 4.5), $G = 8$ dB is the total loss around the loop and $\text{NF} = 7$ dB is the noise figure of the sustaining amplifier. The result is shown in figure 4.8 indicating -2 dBc/Hz phase noise suppression at 1 Hz carrier offset and -186 dBc/Hz thermal noise floor. To the best of the authors' knowledge this was the lowest noise floor achieved with an IC-compatible micro-acoustic (SAW, FBAR, MEMS) resonator at the time of publication [121]. If the flicker noise constant of the sustaining amplifier α_E and the 1 Hz intercept point (in this case -2 dBc/Hz) are known, it is possible to calculate the flicker noise constant of the FPAR α_R using the following equation [125]:

$$\mathfrak{F}(1\text{Hz}) = 10 \log\{0.5[\alpha_R F_0^4 + \alpha_E (F_0/4Q_L^2)]\} = -2\text{dBc/Hz}, \quad 4.2$$

където $\mathfrak{F}(1\text{Hz}) = -2\text{dBc/Hz}$ е шума при 1 Hz отстояние от носещата честота F_0 . With $\alpha_E = 2.2 \times 10^{-14}$ Hz for the UTO-1023 amplifier [124] we calculate flicker noise constant as low as $\alpha_R = 2.1 \times 10^{-36}$ /Hz [122]. This value is comparable with some of the best SAW resonators built to date in this frequency range [125] and indicates the potential of the S0 Lamb wave technology for integrated low-noise oscillator applications. The results achieved in this study are summarized along with the state of the art prior their dissemination. Lamb wave-based oscillators in the frequency band 200 MHz – 1 GHz have shown a phase noise of about -90 dBc/Hz at 1 kHz offset frequency independently on the LWR topology used. Close-in phase noise of various S0 Lamb wave resonator based oscillators are summarized in Table 4.1.

S0 Resonant Structures	Resonance Frequency	Noise [dBc/Hz]
Edge type (CMR)	222 MHz	-88 [127]
Edge type (CMR)	483 MHz	-88 [128]
Edge type (CMR)	583 MHz	-93 [129]
Edge type (CMR)	1.05 GHz	-81 [101]
Grating type	880 MHz	-92 [121]

Table 4.1 Phase Noise (PN) at 1KHz frequency offset

4.2 A RF MEMS voltage transformer [130 - 132]

This section presents an invented RF MEMS voltage transformer (WO/2012/156818A3) employing an AlN based S0 Lamb wave resonance structure. The device was designed employing the presented above theoretical models. Owing to its relatively low frequency of 423MHz fixed reflectors were adopted in the design the design. A double busbar topology was successfully implemented for suppression of unwanted spurious modes in the structure.

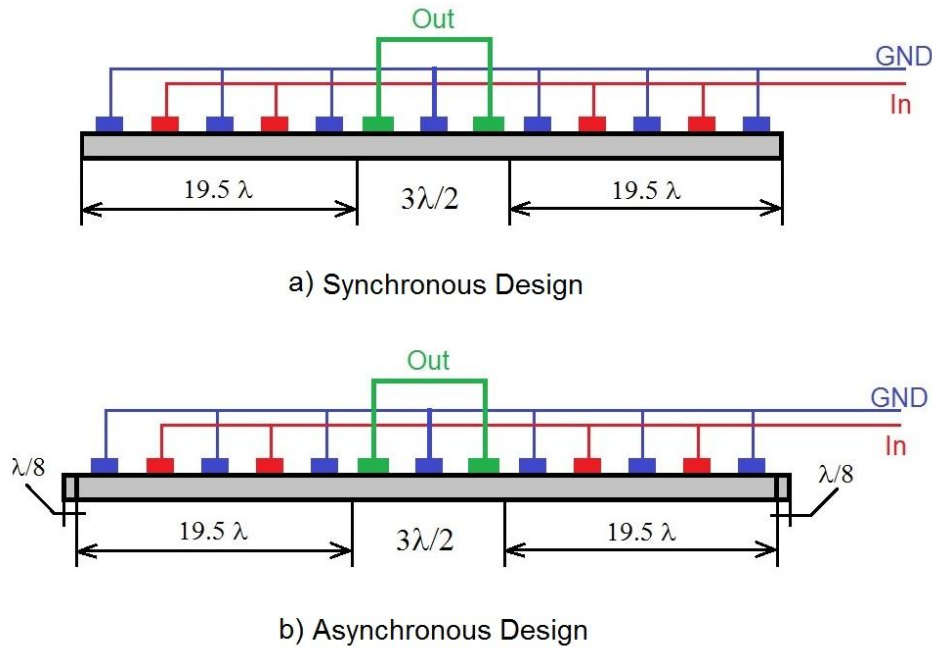


Figure 4.10 Sketch view of the S0 Lamb wave transformer designs. a) Synchronous (S) cavity b) Asynchronous (AS) cavity

In figure 4.10 cross-section sketches of the resonant S0 Lamb wave transformer designs are shown. The S0 Lamb wave transformer design employs an input interdigital transducer symmetrically surrounding a 2-strip output interdigital transducer. positioned in the middle. 300nm thick Mo electrodes with metallization ratio $mt=0.5$ are forming the periodic gratings of the transducers with pitch $\Lambda=\lambda/2$, where $\lambda=25.5\mu\text{m}$ is the acoustic wavelength. The number of pairs in the input transducer N_t is between 20 and 40, while the device aperture W is between 5λ and 25λ . Accordingly the maximum device footprint is about 0.65mm^2 . The proposed designs are with input matched to 50 Ohm impedance and high impedance output. At resonance frequency, the energy is confined near the output transducer, which along with the impedance transformation between input and output transducers effectively transform the voltage. The difference between both sketched designs is in their synchronism of the resonant cavity. Unlike the synchronous design, the asynchronous design features a resonance cavity with $\lambda/4$ shifted length $L=n\lambda/2+\lambda/4$. The asynchronous design demonstrates larger unloaded transformation coefficients, while being more sensitive to the external load impedance. Accordingly, with external output impedance of

10k Ω both types of transformers demonstrate similar loaded transformation coefficients of the voltage.

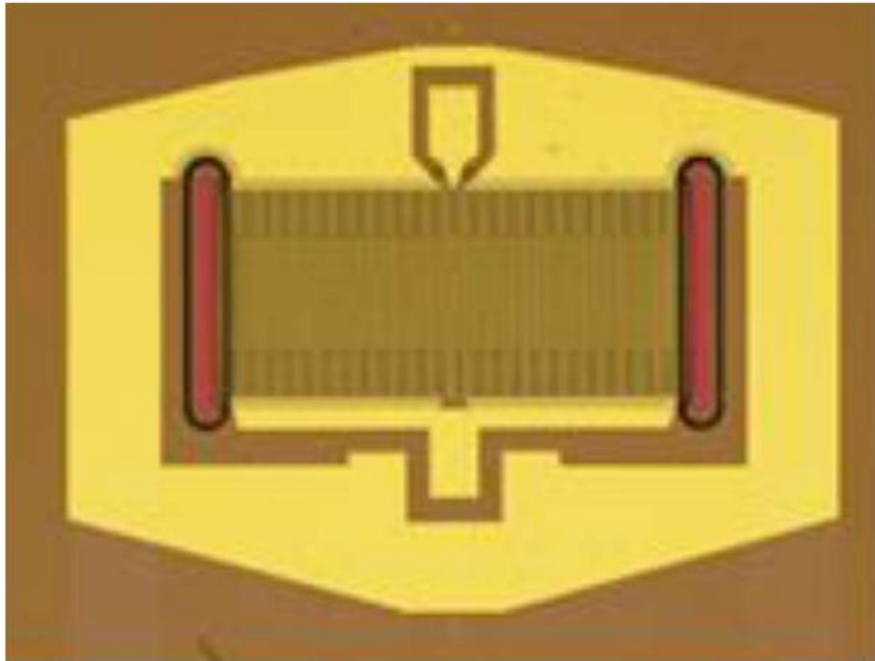


Figure 4.15. Fabricated resonator structure with 38 IDT pairs. Edge boundaries are defined by through substrate reactive ion etching.

In figure 4.15 the device is shown as fabricated. Testing was performed using on wafer S-parameter probing with results of just the transformer. Open circuit (unloaded) gain is determined from the S-parameters as $G_{21}=g_{21}^U=22\text{V/V}$, with return loss better than 11dB. The fabricated S0 Lamb wave transformer was implemented in a radio frequency system that could detect signal below -60dBm with less than 10nW of power consumption. Cascaded conversion gain of the resonator and envelope detector measured at the detector output showed 40V/V gain. Figure 4.18 shows the transformer implementation in a circuit with two transformers.

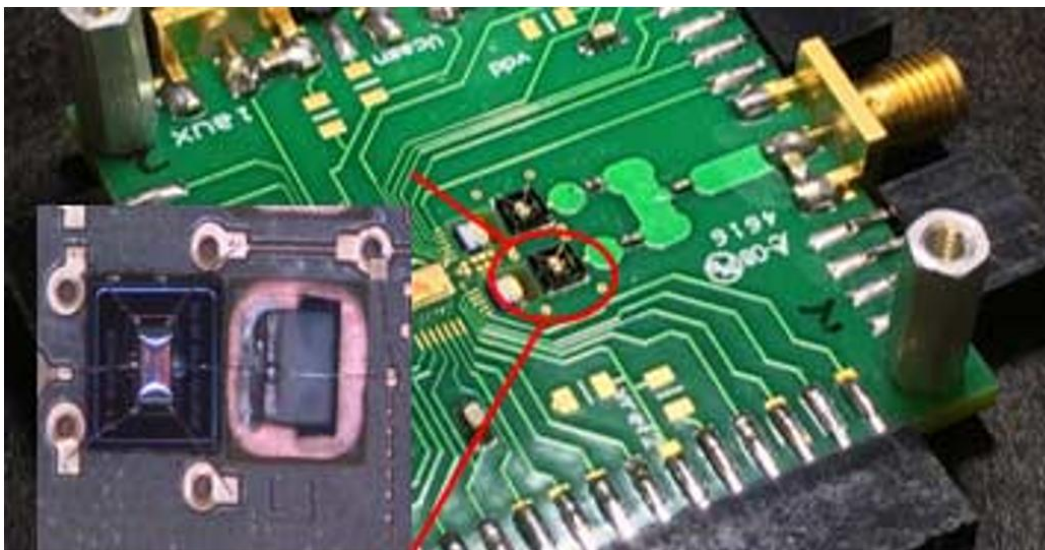


Figure 4.18 RF receiver assembly incorporating dual resonators, shunt inductors and a sub-threshold low power active detector custom IC.

4.3 RF gravimetric sensors [133, 146, 147]

Two-port S0 Lamb wave resonators have demonstrated insertion loss of around 3 dB and an unloaded Q of 3000 at a frequency of 0.9 GHz. Also, 0.9 GHz FPAR based oscillators have exhibited low phase noise. These results, along with the expected high mass sensitivity of the S0 Lamb mode in acoustically thin plates [134, 135], motivated us for this study. The mass sensitivity of the S0 Lamb wave was theoretically and experimentally studied in view of combining high sensitivity with low losses [133]. The results were further supported by measurements in gas phase environment for Xylene detection. The analytical results suggested the use of acoustically thin gas sensitive coatings in the S0 Lamb wave resonators. Thus, the high mass sensitivity of the device can be combined with low loss performance to achieve high detection resolution.

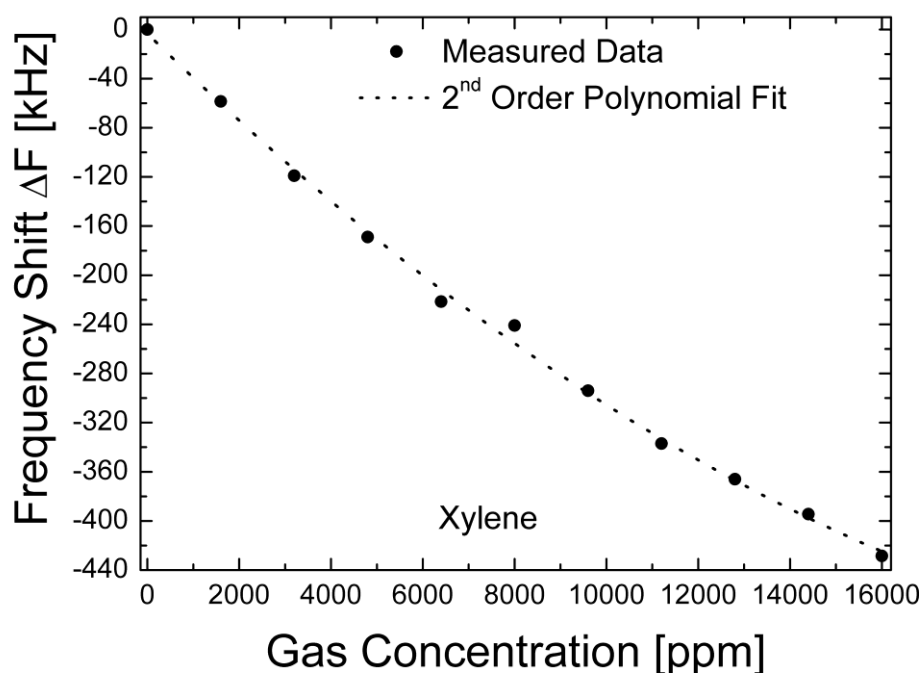


Figure 4.30 Sensitivity to Xylene for the 2-port S0 Lamb wave resonator coated with 380 nm HMDSO

The experimental sensitivity of the 380 nm HMDSO coated FPAR device to xylene concentration is shown in figure 4.30. The sensitivity curve is nearly linear with a 31 Hz/ppm slope which is about 5 times higher than the sensitivity of the STW resonator from [144], operating at about the same frequency. At the same time the S0 Lamb wave resonator insertion loss varied within 1 dB over the whole concentration range which has a negligible effect on the sensor oscillator performance. Table 4.4 summarizes the calculated mass sensitivities of the three types of resonators toward xylene. In order to compare the sensitivity values to the theoretical estimates,

the relative sensitivity toward xylene, defined as the ratio of the absolute sensitivity (in Hz/ppm) to the unloaded resonance frequency, was calculated for LWR, STW and RSAW, respectively. These sensitivities were found to be in relation 5.0/1.3/1.0 for LWR versus STW versus RSAW, respectively, which is in good agreement with the theoretical expectations.

Mode	Frequency	Sensitivity [Hz/ppm]
RSAW on Quartz	430 [MHz]	7.2 [144]
STW on Quartz	700 [MHz]	9.1 [144]
S0 Lamb wave on AlN	890 [MHz]	31 [133]

Table 4.4 Sensitivity to xylene of HMDSO coated resonators

The results from this section suggest that S0 mode resonators employing acoustically thinner sensing films are preferable in order to preserve the low noise and low loss performance of the sensor, while benefitting from the improved sensitivity of the Lamb wave resonator technology. Most generally, the design of a gravimetric sensor employing the S0 Lamb wave in thin AlN membranes is application specific. Resolution, exceeding that of the other competing micro-acoustic technologies such as surface transvers wave and surface acoustic wave technologies, is quite feasible. The design of high-resolution sensor requires an optimal ratio between increased sensitivity and added noise by both the viscosity of the sensing layer and the analyte.

Theoretical and experimental studies were conducted on S0 Lamb wave resonators immersed in liquid environment. The results have clearly demonstrated the ability of the resonators to operate as a gravimetric sensor in liquid environment. The use of electrically screened, by means of continuous electrode, bottom surface makes the device exclusively sensitive to the mechanical properties of the liquid. Comparative measurements of the resonators in solutions of sucrose and ethylene glycol at comparable values of the mass density revealed relatively larger sensitivity of the devices towards the liquid density and relatively smaller sensitivity towards the liquid viscosity. Apart from the mechanical sensing, S0 Lamb wave resonators can also sense changes in the dielectric permittivity (ϵ) of the liquid, provided that the immerse surface is not electrically screened. This specific sensing originated by variations of the electromechanical coupling factor of the resonator when the dielectric permittivity of the liquid changes.

Combining electrically screened and electrically non screened devices allows for distinct detection of mechanical and electrical properties of the liquid environment.

4.4 A RF pressure sensor

Beside the mass sensitivity, the thin-film Lamb wave resonators appeared quite sensitive to ambient pressure partially because of the large aspect ratio of the AlN membrane. The AlN membrane is being significantly deformed upon external pressure, which in turn induces large mechanical stress causing a change in AlN elasticity. As a result, the the resonance frequency of the resonator shifts. The pressure sensitivity of the S0, the A1 and the S1 modes in one resonator structure was studied theoretically and experimentally in a comparative manner. Those modes are native for the thin-film Lamb wave resonator and appear in different frequency bands as peaks in the device admittance. It was predicted and experimentally verified the relatively larger pressure sensitivity of the S0 Lamb wave as compared to that of the the A1 and the S1 modes. The main mechanism behind this sensitivity was identified. The experiment was performed on a synchronous thin-film Lamb wave resonator which was mounted in a specifically designed test fixture which allows for RF probe supported measurement of the frequency response of the device under press bias.

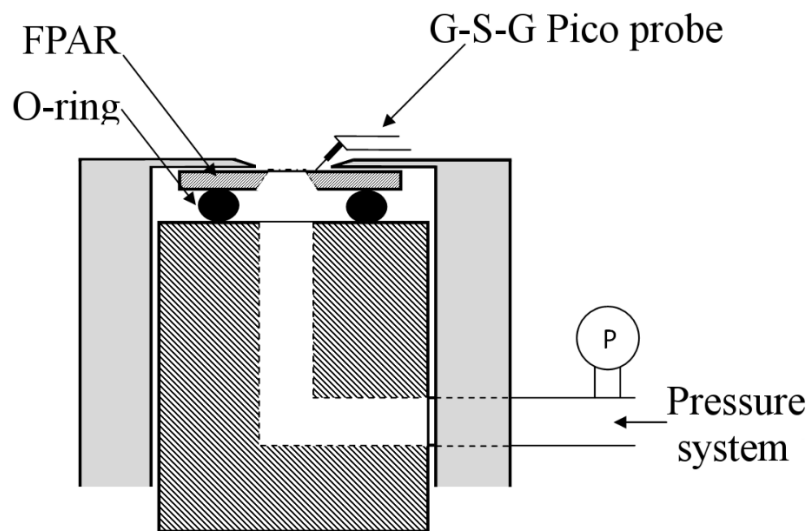


Figure 4.43 Cross section of the fixture for pressure measurements

To investigate the pressure sensitivity of the devices, a fixture, compatible with the 6 mm × 6 mm resonator chips, was designed and manufactured, see figure 4.43. The Lamb wave resonator chip is mounted into the fixture by firmly pressing it against an o-ring lubricated with vacuum grease. A digital pressure indicator GE Duck DPI 705 was used to monitor the pressure, while FPAR frequency response was measured by a G-S-G pico-probe supported HP8364B network analyzer, as demonstrated in figure 4.44. In the pressure system, a hydraulic accumulator was used together with pressure regulators and a flow control valve. In figure 4.44a, the S0, A1 and S1 resonances are indicated along with their resonance frequencies and Q factors. The Q factors at resonance frequency (F_R) were determined by the admittance phase (ϕ) derivative $Q = 0.5f \partial\phi/\partial F$. The smaller peak on the left-hand side of the S1 resonance originates from the S1 mode as well according to the fact

that modes in periodical systems demonstrate a stopband behavior with pronounced lower and upper frequency stopband edges. In figure 4.44b the test fixture is shown with mounted Lamb wave resonator chip and RF probe measurement system.

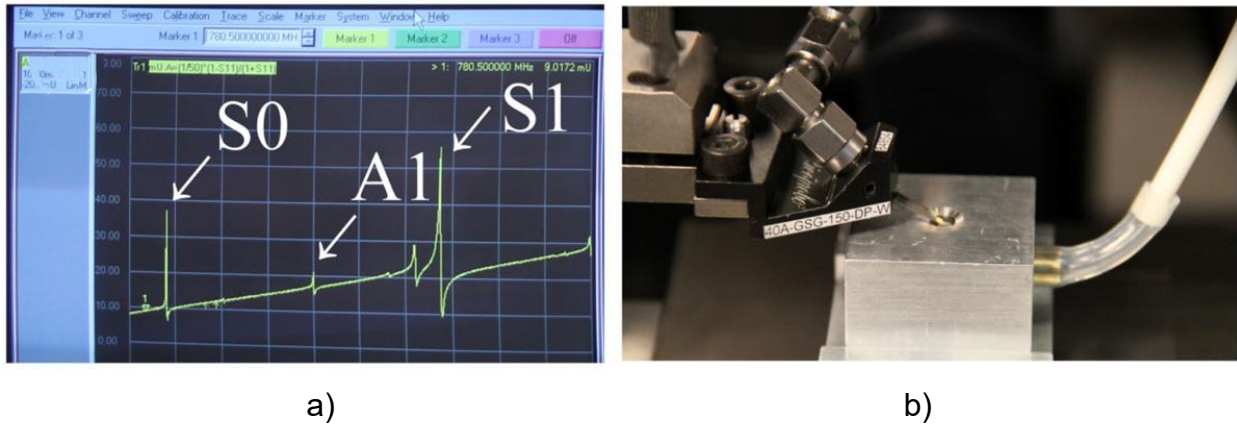


Figure 4.44 The experimental setup with a) the HP8364B network analyzer b) the G-S-G RF probe and the fixture for mounting the chip.

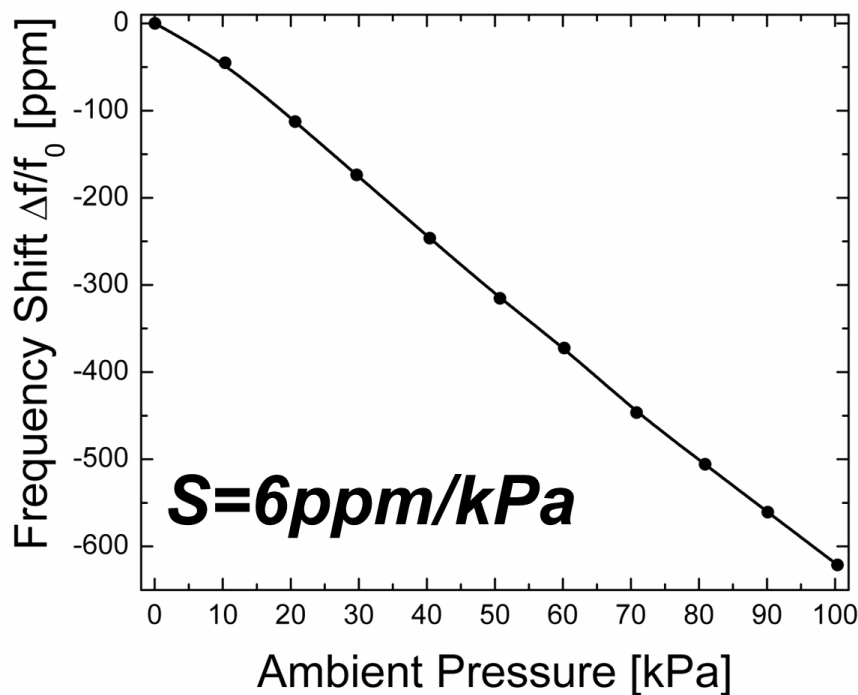


Figure 4.51 Measured ambient pressure sensitivity of the S0 mode up to 100kPa

As measured, the S0 mode is the most pressure sensitive in the structure. The device measurements up to 100kPa ambient pressure shown very good linearity and sensitivity of 6ppm/kPa [23] (see figure 4.51). Significant improvement in sensitivity of the S0 Lamb wave was later demonstrated in composite membranes [160], reaching levels of 1 ppm/Pa at 750MHz operation frequency.

Chapter 5. A1 LAMB WAVE RESONATORS ON LiNbO_3 SUB-MICROMETER PLATELETS

The A1 lamb wave resonator (currently popular as XBAR) on LiNbO_3 was invented and first demonstrated by Dr. Michio Kadota at Murata Manufacturing, Japan back in 2010 [24], currently he is a research professor at Tohoku University in Japan. This specific version of a Lamb wave resonator addresses the challenge of achieving high frequency devices suitable for 5G wide band filter applications. This pioneering work well accounted the earlier contributions on S0 Lamb wave devices on ZnO [167], AlN [2] and Quartz [168], pointing their inherent limitations when it comes to resonance frequency and electromechanical coupling. As many others, this invention appeared a bit premature with respect to the needed technology and yet emerging applications. Back in 2010 the only way to get a sub-micrometer thick LiNbO_3 platelet was by means of chemical vapor deposition (CVD). More specifically epitaxial c-axis oriented LiNbO_3 films were deposited with thicknesses of 340nm and 480nm, while their crystalline quality approached full width half maximum of the XRD ω -scan in the range of 0.2° . These epitaxial films were used to prototype the first A1 Lamb wave resonators on LiNbO_3 with resonance frequencies of about 6.3GHz and 4.5GHz. These first devices demonstrated up to 7.2% resonance to antiresonance frequency bandwidth and impedance ratio of up to 52dB.

It took few more years for the development of the piezoelectric-on-insulator (POI) technology, enabling a sub-micrometer thick layer transfer directly from a single crystal piezoelectric substrate. The development of the ion-sliced layer transfer technology has brought a significant leap in RF micro-acoustic technology with the invention of the thin film surface acoustic wave resonators (FSAW) in 2016[12]. Already in 2017, this new technological platform was well utilized in the prototyping of MEMS-type A1-Lamb wave resonators [26] on LiNbO_3 . More specifically this work realized 4GHz - 5 GHz resonators based on the first-order antisymmetric (A1) Lamb-wave mode in ion sliced Z-cut LiNbO_3 thin films. It was well realized that ion-sliced LiNbO_3 thin films have single-crystal quality and permit a higher device quality factor and large electromechanical couplings of up to 30%. An interesting (important) nuance of the work was that pair of interdigitated electrodes with smaller metallization ratio can bring significant boost in device electromechanical coupling and enables approaching the limits of the inherent electromechanical coupling of the Z-cut LiNbO_3 crystal. In fact, in this mode of operation the device operates very much like a shear bulk resonator at fundamental resonance in the platelet between the electrodes, being excited laterally by the horizontal electric field of the electrodes. This analogy, has brought the currently popular name of this device, namely lateral field excited bulk acoustic resonator (XBAR) [27]. It is also related to the fact that achieving higher electromechanical coupling requires operation

on A1 close to its cut-off frequency (i.e the frequency of the fundamental bulk resonance).

Although, these key enabling works paved the way for the prototyping of this new class of devices, a number of key inventions were needed to promote this device for industrial applications. These inventions, which are essential part of this thesis, are well discussed in the sections below, while here they are briefly summarized. For further increase of the device electromechanical coupling a family of 120Y-X LiNbO₃ cuts was proposed [30] which makes the XBAR technology suitable for the wideband application in the 6 GHz– 7 GHz range. One large drawback of the XBAR was the use of narrow and thin interdigitated electrodes over sub-micrometer thick platelet with poor thermal conduction. This type of design was practically useless when the usual power requirements are considered. Here two key inventions helped overcome this deficiency. These are the invention of “thick” interdigitated electrode topologies [28] and the solidly mounted XBAR topology [169]. The use of thick electrodes with thickness comparable to that of the piezoelectric platelet has brought additional complexity related to the fact that some unwanted spurious modes were significantly affected by the sidewall angle of the electrodes and this need to be included in the design and in the process control. Another version of the solidly mounted resonator was proposed employing a Bragg reflector not under the entire piezoelectric platelet but as Bragg-pedestals under the electrodes [170]. In this configuration the acoustic losses of the Bragg stack are significantly reduced, while efficient heat conduction path towards the base substrate is secured. In another important invention, the temperature coefficient of frequency is reduced through the design of specific bi-layered structures employing a half wavelength thick SiO₂ on/under the LiNbO₃ piezoelectric platelet [171]. Some of these inventions were implemented in the first demonstration of n79 filter [29, 172], which was considered a breakthrough achievement, enabling further private investments in this technology and resulted in subsequent acquiring of Resonant Inc. USA by Murata Manufacturing, Japan in 2022. In 2025 was the first announcement that the XBAR technology resulted in a product [173].

In this thesis, only part of the work is revealed which is thought to be more practically relevant or scientifically stimulating, while already being publicly revealed. The biggest leap in the technology is discussed in this thesis. This includes mainly the design of A1 Lamb wave resonators suitable for operation under relatively larger RF powers. Structures with thick electrodes, Bragg mirrors and pedestals were invented in this context. A specific emphasis is on the design with sufficient suppression of spurious modes originating from the interaction between A1 Lamb wave and the lowest order A0 and S0 Lamb waves assisted by the loading effect of the the electrodes of the interdigital transducer [190]. Low stress at the electrode interface in combination with mark-to-pitch ratio $mt \leq 0.3$ were found good to suppress the

spurious content including the 3rd lateral A1 Lamb wave harmonic A1-3. The low stress at electrode interface can be achieved by a specific thickness of the electrodes. More specifically, the frequency of the A3 Lamb wave under the electrode should have be close to the frequency of the A1 mode outside the electrodes. This specific condition is illustrated on figure 5.4. In situation when the A3 Lamb mode in the Al/LiNbO₃ structure have close frequency to the A1 Lamb mode in the LiNbO₃ platelet, the normal shear stress $T_5 = c_{55} * S_5$ is becoming small since the interface between Al and LiNbO₃ is in the vicinity of the extremum of the shear displacement amplitude along thickness direction.

Figure 5.5 shows the in-plane shear displacement of the A1 Lamb wave device operating in the vicinity of the Eigen frequency of the A3 mode in the composite. It can be seen that the shear vertical strain at the electrode interface remains low since the displacement magnitude is near extremum. The synchronous conditions are derived under the condition when the A3 mode in the Al/LiNbO₃ composite has the same Eigenfrequency as the A1 mode in LiNbO₃ platelet. It was found that for this specific case the synchronism condition converges to the thickness ratio $d_{Al}/d_{LiNbO_3} = 1.27$. There is a design frame for this ratio between 0.95 and 1.45, where designs with fewer and sufficiently suppressed spurious modes are possible [176].

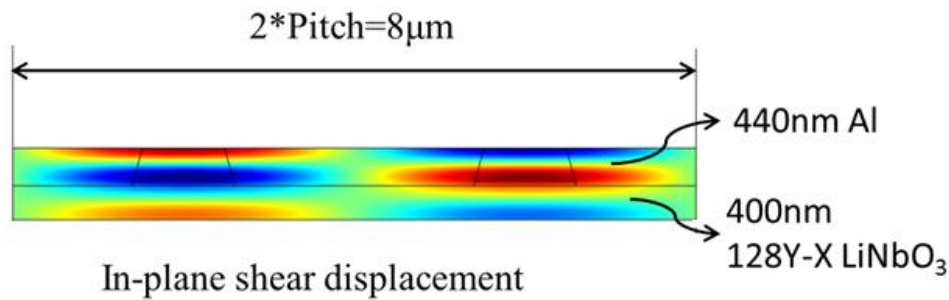


Figure 5.4 Shear displacement distribution in 440nm Al/ 400nm LiNbO₃ composite

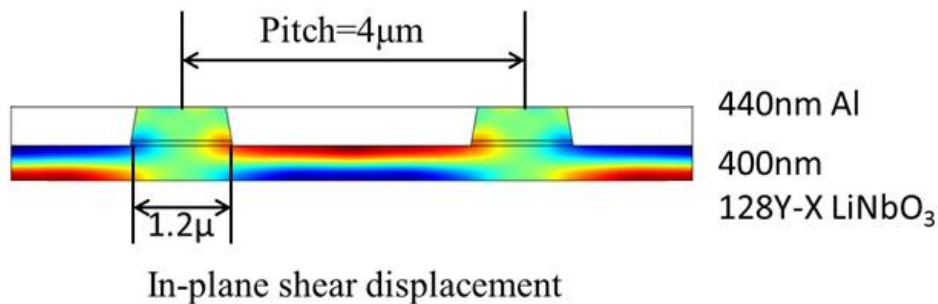


Figure 5.5 Shear displacement distribution in IDT with 440nm thick Al Electrode with $mt=0.3$ on 400nm LiNbO₃ composite

Properly chosen stack definition is prerequisite for low spurious content design but insufficient. It was found that the electrode mark-to-pitch ratio as well as the electrode side-wall angles are of significant importance and the precise spurious mode control requires also a precise technological control over those design parameters. This peculiarity along with the highly

depressive nature of the A1 Lamb wave mode for $d_{\text{LiNbO}_3}/\Lambda \approx 0.1$ (i.e frequency depends on LiNbO_3 thickness as $\sim 1/d_{\text{LiNbO}_3}$) makes this technology very challenging in reality as it requires tight control on technological tolerances. The complexity of the frequency and spurious mode control seems to exceed that of the state-of-art thin film bulk acoustic resonators.

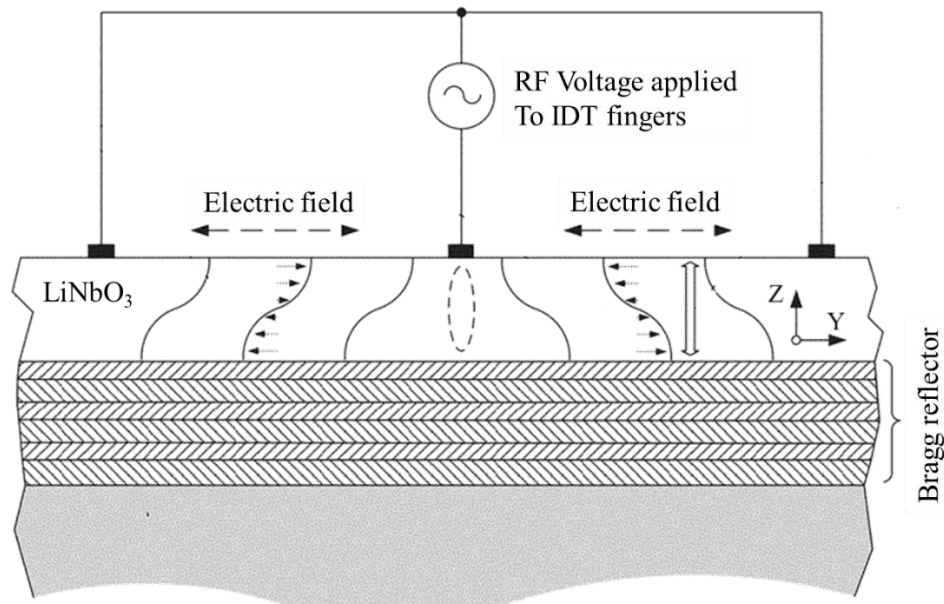


Figure 5.23 Sketch view and shear acoustic displacement distribution in a solidly mounted (SM) A1 type resonator [169].

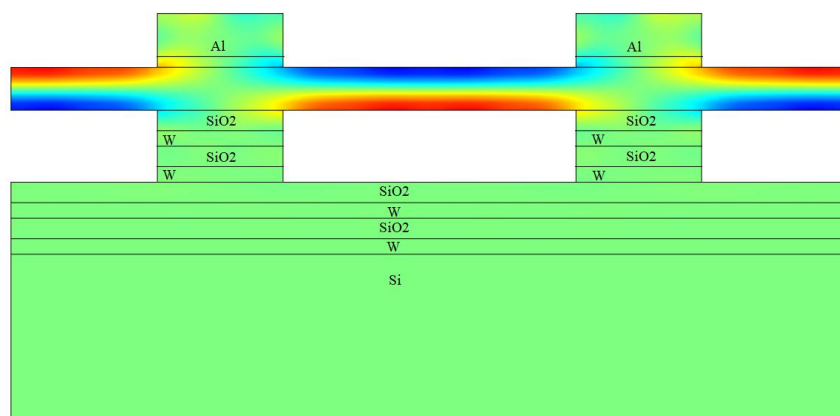


Figure 5.24 Sketch view and operation of a SM A1 Lamb wave resonator with Bragg mirror pedestals

The requirement to design Al Lamb wave resonators with enhanced reliability and power handling brought the research to the invention of the solidly mounted A1 Lamb wave resonators employing Bragg reflectors (see figure 5.23) as well as Bragg type pedestals (see figure 5.24), which are able to provide an efficient heat conduction at higher powers of operation.

Split resonators with similar membrane areas were proposed in RF filter design in order to improve manufacturability and reliability of the filters. Band n79 and wi-fi filter prototypes were demonstrated.

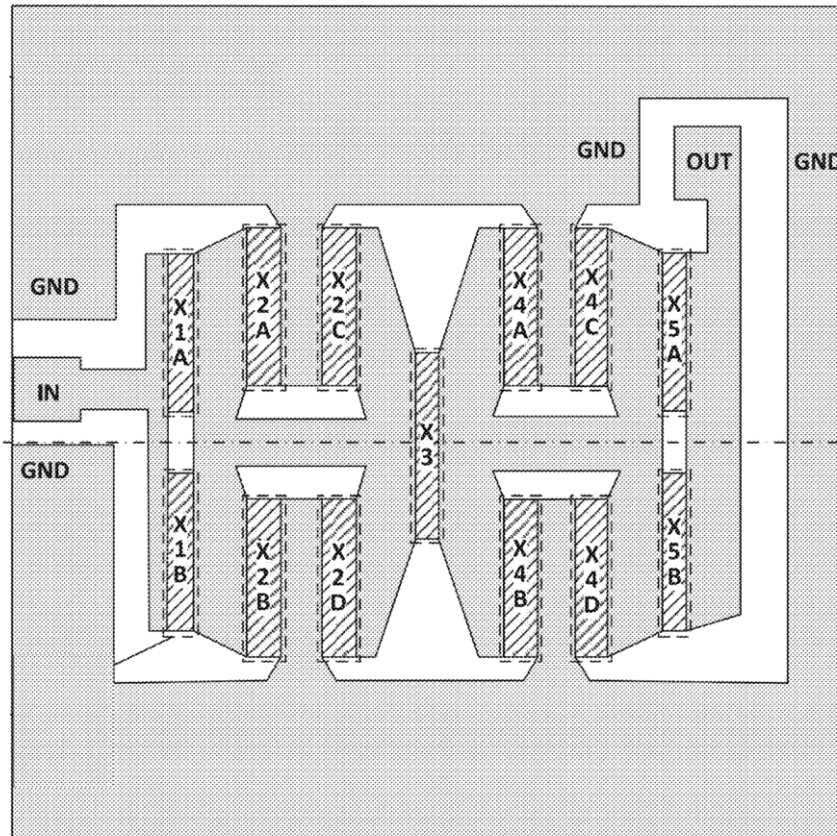


Figure 5.28 Symmetric filter layout used in the first A1 Lamb wave filter prototypes

Another key invention in the field was the proposal of the rotated Y-X family of cuts [30] of LiNbO_3 , which have boosted the electromechanical coupling by 30% from the nominal as compared to the state-of-art at that time Z-Y LiNbO_3 cuts [177].

The first RF filter compatible with the specifications of the n79 band were designed by Me in cooperation with Dr. B. Garcia as part of a R&D consultancy contract with Resonant Inc. The filter employed 500nm thick electrode A1 Lamb wave resonators on Z-Y cut LiNbO_3 with 398nm thickness. The resonator scheme was a 5-resonator ladder filter, inherently matched to 50Ω environment. The filter consisted 3 series and two shunt resonators. This filter has used splitting of the resonators in sub resonators with similar areas and distributing them in a symmetrical manner throughout the layout. This technique was successfully patented [172]. The essence however, is not in the symmetry of resonator alignment but in their splitting and cascading, which ensure LiNbO_3 membranes with similar areas. This aspect is very important for improving the manufacturability and device reliability. Later this structure was also used in the research by independent groups [186, 187]. The filter layout is very similar to the one described in the original patent [172]. In figure 5.28 the symmetric filter layout is shown as patented. The first series and third series resonators are splitted into two resonators with same topologies connected in parallel, while shunt resonators are splitted into four equal resonators connected in parallel. In

some practical realizations the second series resonator in the middle is splitted in 2 larger resonators cascaded in series, ensuring thus greater power handling capabilities. Some similar designs, specifically engineered to increase their RF power handling ability, have been measured to exceed 31 dBm continuous wave (CW) input power at room temperature [29].

The accuracy of the employed design methodology (here treated as a company trade secret) is demonstrated in figure 5.32. Very good agreement between measured and simulated performance is reached. The prediction of the spurious mode content on the left side of the band is well predicted in frequency position and magnitude. The A1 Lamb wave filter prototype is implemented on an ion-sliced 400nm thin film of ZY-oriented single-crystal LiNbO₃ bonded to a 250 μ m thick Si carrier wafer from NanoLN [188].

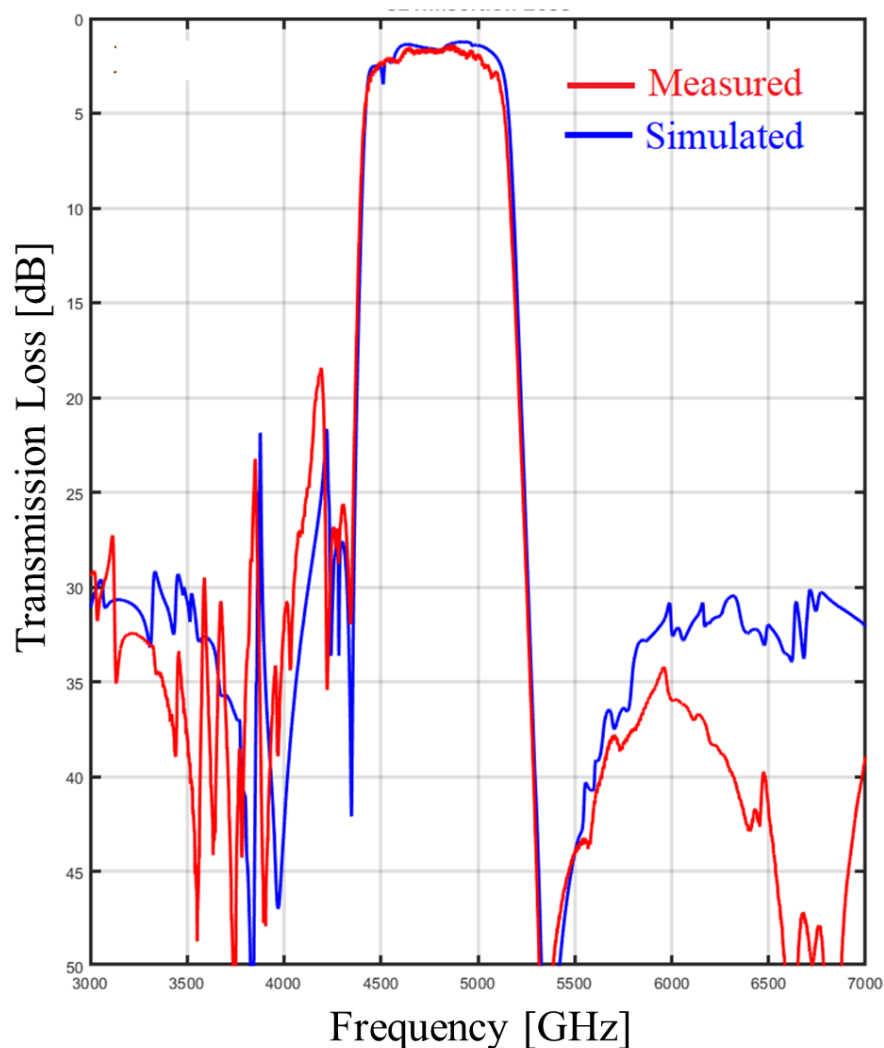


Figure 5.32 Comparison of the S21 characteristics of measured and simulated filter design

For these 2 years of research, I authored and co-authored many US patents on the topic. In some contributions, a symmetrical loading of the LiNbO₃ platelet was further proposed to help suppressing the coupling between the A1 mode and the A0 mode (e.g [191, 192]). This invention

appeared to be of substantial importance towards the design of the first A1 mode wideband filters for the Wi-Fi market. In a subsequent extension of the symmetric topology, extra tuning of the thickness of the symmetrically placed dielectric layers aimed at suppression the higher order A3 mode in the structure, thus suppressing interference with higher frequency bands [193]. This structure has demonstrated reliability and fabrication compatibility suitable for mass fabrication, while maintaining moderate levels of power handling and retained electromechanical coupling. These results were just recently reported by Resonant Inc. (a Murata Manufacturing company) during their invited talk at the most prominent conference in the field, the 2025 IEEE Int. Ultrasonic Symposium held in Utrecht, Nederland [193].

CHAPTER 6. THE PRESENTED THESIS IN A NUTSHELL

Chapter 1 is an introduction to the field with the aim to set the context of this thesis. The main micro-acoustic wave technologies are discussed along with their state-of art progress. Three distinctive resonator technologies are outlined. These are the thin-film bulk acoustic wave resonator technology, the surface acoustic wave resonator technology and the thin-film Lamb wave resonator technologies. The thin film Lamb wave resonator technology is practically initiated with this thesis. It is noted that some thin film Lamb wave devices were published earlier, but thin film Lamb wave resonators were demonstrated originally with the first scientific publication included in this thesis. Accordingly, the goal of the Thesis is the development from the fundamentals up the “Thin-Film Lamb Wave Resonator Technology”, which is also the title of this thesis. This development includes theoretical, fabrication and application aspects and have been conducted during a 15 years period. Thin film Lamb wave resonators on AlN and LiNbO₃ thin films are described as research topics in this thesis.

Chapter 2 describes the development of the analytical tools for the design of thin-film Lamb wave resonators. These developments are extending and adapting the theoretical models known from the surface acoustic wave design. In section 2.1 an acoustic field analysis for Lamb wave propagation in thin platelet with periodic gratings is developed based on the Floquet-Bloch theorem for wave propagation in periodic structures. In section 2.2 the Green’s function method is adapted to the Lamb wave excitation in interdigital and comb longitudinal wave transducers. The developments extend the analytical methodologies in acoustic wave physics. Many excellent books describe the state of art theory, which is in the fundamentals of the models developed here [194 -198]. With the emergence of highly productive software for finite element methods (FEM) simulations, the theoretical development switched to the development of efficient FEM routines for the design and analysis of Lamb wave resonant structures. In section 2.3 efficient finite element method routines are developed for fast analysis of the Lamb wave resonator structures, which can be directly

compared to the analytical tools developed in sections 2.1 and 2.2. Further the analysis of in-plane dispersion characteristics is introduced in 3D periodic structures. Based on the results in sections 2.1, 2.2 and 2.3, in section 2.4 the coupling-of-modes formalism is introduced for the design of Lamb wave resonators. This is a phenomenological theory with few parameters related to the excitation and propagation characteristics of the Lamb waves. Methods for deriving those parameters from field analysis and finite element method simulations are proposed along with experimental routines with fitting the coupling-of-modes theory to the experimental data. An equivalent circuit model of the Lamb wave resonators is derived from the coupling-of-modes theory. The developed theoretical analyses are used in the subsequent Chapters for the design of innovative Lamb wave resonant devices.

Chapter 3 is dealing with the design, the fabrication and the characterization of thin-film Lamb wave resonators on piezoelectric c-textured AlN deposited on Si substrate (4" wafer). Section 3.1 shows the very first pioneering thin-film S0 Lamb wave resonators. These devices were preceding the theoretical modeling abilities and are designed directly from the concept as feasibility test resonators. The first results highlighted many design and fabrication deficiencies to be solved, but highlighted the potential of this technology and its ability to be further improved. In section 3.2 S0 Lamb wave resonators with improved technology and optimized designs are demonstrated in a second iteration of the S0 Lamb wave resonator development. These includes one-port and two port resonator designs with high Q factors which were designed employing the coupling-of-modes theory. The S0 Lamb wave resonator design was further extended to high Q MEMS resonators with suspended edges and various bottom electrode configurations for achieving enhanced electromechanical coupling. Design optimization is also performed in view of suppressing transverse modes excitation in the structures. A novel "double busbar" topology is introduced for the design of spurious free S0 Lamb wave resonators. Inherent thermal drift compensation in composite AlN/SiO₂ membranes is theoretically studied and experimentally demonstrated. Section 3.3 demonstrate a novel resonant device employing mode – conversion between the S0 Lamb wave and the A1 mode at its cut-off frequency. This novel device principle is theoretically described and experimentally verified in first in class thin film resonator. Until this invention, energy confinement in acoustic resonators have been achieved by means of fixed or distributed acoustic reflectors, while in this case the wave is refracted and coupled to the fundamental bulk resonance of the platelet. Finally, a novel S1 Lamb wave resonator without any reflecting or refracting is theoretically described and experimentally demonstrated. It operates on the zero-group velocity dispersion feature of the S1 Lamb wave. This novel device type employs reflectionless split-

electrode interdigital transducers with few guarding strips on each side and represent a device with inherently confined waveguided mode.

Chapter 4 reviews the subsequent work on demonstrating the practical utility of the thin film S0 Lamb wave resonators on AlN. Demonstrated is a low noise frequency source operating at larger powers for achieving low thermal noise floors. The low noise of operation aligns well with the very high gravimetric sensitivity of the devices and highlights potential applications in high resolution chemical Gas sensors. S0 Lamb wave resonators shown very promising performance characteristics when immersed in water. Its sensitivity to viscosity is further characterized both theoretically and experimentally. Application in chemical bio- sensors is feasible. Further the S0 Lamb wave shown very high sensitivity to ambient pressure. Pressure sensitivity is studied theoretically and experimentally. The device demonstrates ability for significant improvement in pressure resolution down to sub 1Pa range. Finally, S0 Lamb wave resonant RF voltage transformers are designed for the first time and applied in low power communication circuits. The presented works highlight the specific advantages of the S0 Lamb wave technology for application in low noise generators, high resolution gravimetric and pressure sensors as well as highly effective RF voltage transformers. The application of Lamb wave resonators in RF filter technology looks feasible mainly for the S1 mode with two-side IDT for maximal electromechanical coupling. Although, the performance remains inferior to the classical thin film bulk acoustic resonators it is industrially interesting due to some cost advantages.

Chapter 5 shows the development from fundamentals up of A1 Lamb wave resonator technology on thin piezoelectric film LiNbO₃. The main application of this type of devices is in wideband filters for 5G telecommunications. The main achievements of the work are related to the design of wideband resonators suitable for RF power compatible with the wireless communication standards. Two wideband filter prototypes are demonstrated. Seven key enabling patents on the topic are included in this Chapter. The main contributions in this Chapter include the design with acoustically thick transducer electrodes, the invention of rotated Y cuts of the piezoelectric crystal for maximum resonance to antiresonance frequency bandwidths, the invention of filter layout with distributed piezoelectric membranes of similar areas, the invention of A1 type resonator on distributed Bragg reflector and the invention of A1 type resonators with Bragg type pedestal supports. Inventions with substantial contribution to the market breakthrough of this technology (e.g [191] and few others) proposed the use of symmetrically loaded resonant configurations, while not considered in any detail in this thesis due to trade secrets. The A1 Lamb wave resonators on LiNbO₃ just got industrialized in extremely wideband RF communication filter in the 5GHz – 7GHz frequency range.

A. Scientific research contributions

A.1 A novel class of RF micro-acoustic resonators is invented. The thin-film Lamb wave resonator technology is introduced for the first time. One-port and two-port high performance S0 Lamb wave resonators with fully clamped and suspended edge membranes are designed, fabricated and characterized. A novel double busbar resonator structure is proposed to suppress the transverse mode spurious content. Inherent thermal drift compensation is proposed and demonstrated for the S0 Lamb wave resonators.

A.2 Theoretical modeling enabling the Lamb wave resonator design is developed on the base of the Floquet-Bloch theorem and Green's function formalism. The analytical routines are further extended by means of the finite element method analysis and used in the calibration of the coupling-of-modes formalism for the design of real resonators.

A3. Novel design principles were proposed and verified. Novel inter-mode-coupled S0-A1 Lamb wave resonators are designed, fabricated and characterized for the first time. Novel zero-group-velocity S1 Lamb wave resonator is proposed, designed and fabricated for the first time. For the first time, an innovative RF voltage transformer (WIPO Patent Application WO/2012/156818A2) is designed, fabricated and characterized employing high performance S0 Lamb wave resonator structure.

A4. For the first time the practical utility of the proposed S0 Lamb wave resonant structures is revealed. Low flicker noise frequency generator stabilized with S0 Lamb wave resonator is shown with low thermal noise floors for the first time. Novel highly sensitivity ambient pressure and gravimetric sensitivity of the S0 Lamb wave resonators are studied theoretically and experimentally in view of enhancing the limit of detection of related sensors. Design and application framework is proposed.

A5. Thin film A1 Lamb wave resonators with enhanced resonance-to-antiresonance frequency bandwidth and enhanced power handling capabilities are invented. Novel design with acoustically thick electrodes and spurious modes mitigation is introduced on rotated Y-cut LiNbO₃ platelets with symmetric composition. A novel acoustic wave device concept employing Bragg mirror pedestals is proposed for the first time (invented)

B. Applied research contributions

B1. S0 Lamb wave design software is implemented employing the developed theoretical models. This software allowed for the design of practically relevant S0 Lamb wave resonator structures. The coupling-of-modes theory adapted to the S0 Lamb wave resonators is suitable for integration with various commercial radio-frequency circuit simulation environments as the Advanced Design System (ADS), QUCS, Aether etc., which is thought to facilitate the industrial design of such resonators.

B2. As part of research and development team, n79 Band filter was designed from the fundamentals up. The acoustic modeling was specifically combined with RF layout modeling and RF optimization algorithm in a complete filter design and optimization algorithm. The results paved the way for the future industrialization of the technology attracting significant private investments, which lead to the acquisition of the technology by a large industrial player.

C. Applied contributions

C1. Microfabrication is specifically adapted to the needs for prototyping of Lamb wave resonators on AlN. The process flow enabled the prototyping of all AlN based Lamb wave resonators described in the thesis.

C2. As part of a research and development team, the author contributed towards the development of low power communication system integrating Lamb wave voltage transformer chips with tuned out parasitic resistances and capacitances.

D. Citations in SCOPUS: About **800** excluding self-citation as of October 2025 in a technical research field with an average impact factor around 2

LIST OF THESIS RELATED PUBLICATIONS

Scientific Publications

1. G. Iriarte et.al., "SAW COM-Parameter Extraction in AlN/Diamond Layered Structures", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr., vol. 50, pp. 1542–1547, 2003
2. J. Bjurström, I. Katardjiev and V. Yantchev, "Lateral-field-excited thin film Lamb wave resonator", Appl. Phys. Lett., vol. 86, 2005.
3. V. Yantchev and I. Katardjiev, "Design and fabrication of thin film lamb wave resonators utilizing longitudinal wave and interdigital transducers," IEEE Ultrasonics Symposium, 2005., Netherlands, 2005, pp. 1580-1583
4. V. Yantchev and I. Katardjiev, "Propagation characteristics of the fundamental symmetric Lamb wave in thin aluminum nitride membranes with infinite gratings", J. Appl. Phys., vol. 98, pp. 849101-849107, Oct. 2005
5. J. Bjurström, V. Yantchev, I. Katardjiev, "Thin film Lamb wave resonant structures – The first approach", Solid-State Electronics, vol. 50, no. 3, pp. 322-326, 2006
6. V. Yantchev, I. Katardjiev, "Quasistatic transduction of the fundamental symmetric Lamb mode in longitudinal wave transducers", Appl. Phys. Lett., 88, 214101, 2006
7. V. Yantchev, J. Enlund, J. Bjurström and I. Katardjiev, "Design of high frequency piezoelectric resonators utilizing laterally propagating fast modes in thin aluminum nitride (AlN) films", Ultrasonics, vol. 45, pp. 208-212, Dec. 2006
8. V. Yantchev and I. Katardjiev, "Micromachined Thin Film Plate Acoustic Resonators Utilizing the Lowest Order Symmetric Lamb Wave Mode", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 54, no. 1, pp. 87-95, 2007
9. G. Wingqvist, L. Arapan, V. Yantchev, and I. Katardjiev, "A micromachined thermally compensated thin film Lamb wave resonator for frequency control and sensing applications," J. Micromech. Microeng., vol. 19, p. 035018, Mar. 2009
10. V. Yantchev, L. Arapan and I. Katardjiev, "Micromachined thin film plate acoustic wave resonators (FPAR): Part II," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 56, no. 12, pp. 2701-2710, 2009

11. I. Avramov, L. Arapan, I. Katardjiev, V. Strashilov and V. Yantchev, "IC-compatible power oscillators using Thin Film Plate Acoustic Resonators (FPAR)," 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, Rome, Italy, 2009, pp. 855-858
12. V. Yantchev, "Coupling-of-modes analysis of thin film plate acoustic wave resonators utilizing the S0 Lamb mode," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 57, no. 4, pp. 801-807, April 2010
13. V. Yantchev, L. Arapan, I. Katardjiev and V. Plessky "Thin-film zerogroup- velocity Lamb wave resonator", Appl. Phys. Lett., vol. 99, No. 3, art. no. 033505, 2011
14. L. Arapan et. al., "Highly mass-sensitive thin filmplate acoustic resonators (FPAR)", Sensors, vol. 11, pp. 6942-6953, Jul. 2011.
15. L. Arapan, I. Avramov, V. Yantchev, "Thin film plate acoustic resonators for integrated microwave power oscillator applications", Electron. Lett., 47, p.453, 2011
16. E. Anders, I. Katardjiev and V. Yantchev, "Lamb wave resonant pressure micro-sensor utilizing a thin-film aluminum nitride membrane", J. Micromech. Microeng., vol. 21, no. 8, pp. 85010-85016, Aug. 2011
17. L. Arapan et. al, "An intermode-coupled thin-film micro-acoustic resonator", Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 22, no. 8, art.no. 085004, 2012
18. V. Yantchev, et. al., "Parametric study of thin-film zero-group velocity resonators (ZGVR)," 2012 IEEE Int. Ultrason. Symposium, Dresden, Germany, 2012, pp. 307-310
19. V. Yantchev and I. Katardjiev, "Thin film Lamb wave resonators in frequency control and sensing applications: A review", J. Micromech. Microeng., 23 (4), 043001, 2013
20. M. Moreria et. al, "Efficient RF voltage transformer with bandpass filter characteristics," Electron. Lett., vol. 49, no. 3, pp. 198–199, Jan. 2013.
21. C. Lin, V. Yantchev, J. Zou, Y. Chen, A. P. Pisano, "Micromachined One-Port Aluminum Nitride Lamb Wave Resonators Utilizing the Lowest-Order Symmetric Mode," in J. of Microelectromechanical Systems, vol. 23, no. 1, pp. 78-91, Feb. 2014
22. V. Yantchev and T. Mirea, "Suppression of transverse-mode spurious responses in thin film lamb wave resonators by bandgap engineering," 2014 IEEE Int. Ultrasonics Symposium, Chicago, IL, USA, 2014, pp. 2552-2555
23. T. Mirea, V. Yantchev, "Influence of liquid properties on the performance of S0-mode Lamb wave sensors: A theoretical analysis", Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 208, pp. 212-219, 2015
24. T. Mirea, V. Yantchev, J. Olivares, and E. Iborra, "Influence of liquid properties on the performance of S0-mode Lamb wave sensors II: Experimental validation," Sensors Actuators B Chem., vol. 229, pp. 331–337, 2016
25. V. Yantchev, J. Kriz, B. Oliver, A. Weidling and T. Fabian, "Design and fabrication of efficient piezo-MEMS voltage transformers," 2017 IEEE Int. Ultrasonics Symposium (IUS), Washington, DC, USA, 2017, pp. 1-1
26. S. Tin, J. Kriz, B. Oliverl, T. Fabian, and A. Weidlingl, G. Niemela, J. Sangid, A. Baruah, K. Harris, B. Blalock, J. Holleman, V. Yantchev, "N-Zero Integrated Analog Classifier (NINA)," in Proc. GOMAC Tech Conf., 2017, pp. 35–38.
27. P. J. Turner, B Garcia, V Yantchev et al., "5 GHz Band n79 wideband microacoustic filter using thin lithium niobate membrane", Electron. Lett., vol. 55, pp. 942-944, 2019.
28. S. Yandrapalli, V. Plessky, J. Koskela, V. Yantchev, P. Turner and L. G. Villanueva, "Analysis of XBAR resonance and higher order spurious modes," 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, UK, 2019, pp. 185-188
29. V. Yantchev, P. J. Turner and R. B. Hammond, "On the Efficiency of Excitation of High Coupling Plate Acoustic Modes," 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Las Vegas, NV, USA, 2020, pp. 1-3
30. J. Koulakis et. al., "XBAR physics and next generation filter design," 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Xi'an, China, 2021, pp. 1-5.

Patents included in the Thesis

1. V. Pleskii, S. Yandrapalli, R. B Hammond, B. Garcia, P. Turner, J. John, V. Yantchev, "Transversely-excited film bulk acoustic resonator", US Patent US10491192B1, 2018
2. B. Garcia, R. Hammond, P. Turner, V. Plesski, V. Yantchev, "Transversely-excited film bulk acoustic resonators for high power applications", US10637438B2, 2020
3. V. Yantchev, B. Garcia, V. Plessky. Transversely excited film bulk acoustic resonator using rotated Y-X cut lithium niobate. US10790802B2, 2020
4. V. Yantchev, "Transversely-excited film bulk acoustic resonator with half-lambda dielectric layer" US Patent US10868510B2, 2020
5. V. Yantchev, "Transversely-excited film bulk acoustic filters with symmetric layout", US Patent US10868513B2, 2020
6. V. Yantchev, et. al., "Solidly-mounted transversely-excited film bulk acoustic resonator", US Patent US11165407B2, 2021
7. V. Yantchev, "Transversely-excited film bulk acoustic resonators with solidly mounted resonator (smr) pedestals", US Patent US12237823B2, 2025
8. V. Yantchev, "Symmetric transversely-excited film bulk acoustic resonators with reduced spurious modes", US Patent US12323125B2, 2025

SUMMARY

The doctorate of science (higher doctorate) thesis entitled "The thin-film Lamb wave Resonator Technology" summarizes the scientific contributions of the author on the topic of thin film Lamb wave resonator technology, which was developed from the fundamentals up and includes large amount of theoretical and experimental contributions. The thesis contents cover 30 research publications and 8 US patents. The total amount of citations on the included research, excluding the self-citation, is exceeding 800 as of October 2025. An, important update on the S0 Lamb wave resonator technology was presented as an invited talk at the 2012 Int. IEEE Ultrasonic Symposium in Dresden, Germany. The next important leap of the technology related to the design of 5G communication filters based on the A1 Lamb wave was reported at the 2019 Int. IEEE Ultrasonic Symposium in Glasgow, Scotland. Recently, the technology has been brought to mass production with main application in the wideband 5G wireless communication systems.

Over the course of research number of advantages of the AIN based S0 Lamb wave have been revealed mainly in the timing and sensing domains. Independently from the first publication [1], STMicroelectronics in France has presented their original work on the topic few months later [20], which was followed by an independent publication by Pisano's group at University of California Berkeley, USA [21,22] and opened the field for many researchers to earn their PhDs and to establish full academic positions. The application of this first-generation Lamb wave technology in RF communication filters, remained limited in RF filter technologies as the demonstrated resonance-to-antiresonance fractional bandwidth remained inferior to the well-established thin film bulk acoustic wave technology [23]. About 5 years after the thin-film Lamb wave resonator invention, the focus got extended not only

on frequency scaling but also on devices with wide resonance-to-antiresonance fractional bandwidth, which required significantly larger electromechanical couplings. This necessity has been motivated by the requirements of the 5G telecommunications, which prioritized some new filters above 4GHz with frequency bandwidths of about 10% and above. In 2010 a breakthrough in the Lamb wave resonator technology have been made by M. Kadota et. al [24] demonstrating devices above 4GHz range with resonance-to-antiresonance fractional passbands of about 7%. These devices employed the A1 Lamb wave in epitaxially grown Z-cut LiNbO₃ thin film. Later with the advancement in the piezoelectric-on-insulator technology [25] this concept has been revisited [26]. During the last 7 years numerous specific inventions brought the A1 Lamb wave technology to industrial maturity. Some of these key enabling inventions are also presented in this doctorate of science thesis.