

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМий
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМий КЕНГАШ**

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

КУРБАНОВ ЖАХОНГИР ОЧИЛОВИЧ

**КУБ ВА ТРИГОНАЛ СИММЕТРИЯЛИ КРИСТАЛЛАРДА АКУСТИК
ТЎЛҚИНЛАРНИНГ СЎНИШ МЕХАНИЗМЛАРИ ВА АКУСТИК
ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИНИНГ АНИЗОТРОПИЯСИ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации
доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам**

**Contents of the abstract of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on
physical and mathematical sciences**

Курбанов Жахонгир Очилович

Куб ва тригонал симметрияли кристалларда акустик тўлқинларнинг
сўниш механизмлари ва акустик характеристикаларининг
анизотропияси..... 3

Курбанов Жахонгир Очилович

Механизмы затухания акустических волн и анизотропия
акустических характеристик в кристаллах кубической и тригональной
симметрии..... 23

Kurbanov Jakhongir

Attenuation Mechanisms of Acoustic Waves and Anisotropy of Acoustic
Characteristics in Crystals of Cubic and Trigonal Symmetry..... 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 47

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМий
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМий КЕНГАШ**

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

КУРБАНОВ ЖАХОНГИР ОЧИЛОВИЧ

**КУБ ВА ТРИГОНАЛ СИММЕТРИЯЛИ КРИСТАЛЛАРДА АКУСТИК
ТЎЛҚИНЛАРНИНГ СЎНИШ МЕХАНИЗМЛАРИ ВА АКУСТИК
ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИНИНГ АНИЗОТРОПИЯСИ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2022.1.PhD/FM683 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ион-плазма ва лазер технологиялари институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.inp.uz) ва “ZiyoNet” ахборот-таълим тармоғида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Ахмеджанов Фарҳад Рашидович
физика-математика фанлари доктори, доцент

Расмий оппонентлар:

Бахрамов Сағдулла Абдуллаевич
физика-математика фанлари доктори, профессор, академик
Азаматов Закиржон Тахирович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

И.А. Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM/T.33 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил “___” _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек қўрғони, ЯФИ; тел. (+99871) 289-31-41; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. (_____ рақам билан рўйхатга олинган.) Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек қўрғони, ЯФИ; тел. (+99871) 289-31-19.

Диссертация автореферати 2022 йил “___” _____ да тарқатилди.
(2022 йил “___” _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси.)

М.Ю. Ташметов

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

О.Р. Тожибоев

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф. PhD,
катта илмий ходим

Э.М. Турсунов

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги вақтда куб ва тригонал симметрияли кристалларининг катта гуруҳи, физик хусусиятлари ва технологик параметрларининг уйғунлиги туфайли саноат ҳамда технологияда акусто-оптик ва акусто-электрон қурилмаларда ишчи восита сифатида кенг қўлланилади. Хусусан, ниобат литий ва танталат литий, литий фтор ва натрий фтор, итрий алюминий гранат кристаллари акустоэлектроника асбоблари ва мосламаларини яратиш учун энг кўп ишлатилади. Шундай қилиб, ниобат литий ва танталат литийнинг монокристаллари кенг шаффофлик диапазонида (0,35-6,0 μm) ва етарлича катта иккиланиб синувчанликка эга, бу уларни акусто-оптик электрон созланиш филтрларда, дисперсив кечикиш чизиклари ва оптик нурланишларни бошқариш учун акусто-оптик конверторларда, акусто-оптикада фаол ишчи муҳити сифатида ишлатиш имконини беради. Акустоэлектроника ва акусто-оптик қурилмаларда кристаллардан фойдаланишда частота диапазонини чекловчи энг муҳим омиллардан бири бу акустик тўлқинларнинг сўниши ҳисобланади. Шунинг учун асосий вазифалардан бири минимал сўниш билан сўниш йўналишни аниқлаш, яъни энг кам акустик йўқотишларга эришадиган кристалли товуш каналларининг йўналишларини излашдир.

Ҳозирги вақтда дунёда кристалларнинг эластиклик хоссаларининг анизотропиясини ҳамда нозикли акустикада кристаллар эластиклик хусусиятларининг анизотропиясини ўрганиш ҳам муҳимдир. Уларнинг фундаментал аҳамиятидан ташқари, турли хил ахборотни қайта ишлаш қурилмаларида ишчи восита сифатида кенг қўлланиладиган ушбу кристалларнинг энг эффектив кесимларини аниқлаш учун зарурдир. Умуман олганда, акустик тўлқинларнинг сўниш механизмлари ва эластик хусусиятларнинг анизотропия қонуниятлари ҳақида фундаментал билимларни олиш, шунингдек, акустик тўлқинлар тарқалиш йўналишининг ўзгариши билан бу хусусиятларнинг ўзгаришини башорат қилиш, шубҳасиз, конденсирланган ҳолатлар физикасининг долзарб муаммоларидандир.

Сўнги йилларда мамлакатимизда материалшунослик соҳасидаги фундаментал тадқиқотларга янги материалларни турли тармоқларида излаш ва аллақачон маълум бўлган материалларнинг хоссаларини, жумладан, диэлектрик, пьезоэлектрик ва сегнетоэлектрик кристалларнинг хоссаларини ўрганишга катта эътибор қаратилмоқда. Ушбу фундаментал ва амалий тадқиқотлар йўналишлари Ўзбекистонда илм-фан ва юқори технологияли ишлаб чиқаришни ривожлантиришда муҳим аҳамиятга эга бўлиб, 2022-2026 йилларда янги Ўзбекистонни ривожлантириш стратегиясида¹ ўз ифодасини топган.

¹ 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сонли “2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”даги Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон “2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”, 2017 йил 26 майдаги ПФ-3012-сон “2017-2021-йилларда қайта тикланадиган энергия манбаларини янада ривожлантириш, иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳада энергия самарадорлигини ошириш чора тадбирлари дастури тўғрисида”ги фармонлари, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий-тадқиқот фаолиятини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги қарори ҳамда ушбу соҳадаги бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожлантиришнинг асосий устувор йўналишларига мослиги. Диссертация тадқиқотлари республика фан ва технологияларни ривожлантиришнинг II. “Энергетика, энергия тежамкорлиги ва муқобил энергия манбалари” устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Бугунги кунда дунёнинг кўплаб мамлакатларидаги олимлар, шу жумладан, россиялик (Ю.В.Гуляев, Б.Д.Зацев, И.Е.Кузнецова, В.В.Проклов, В.В.Леманов, Н.К.Юшин), америкалик (Самуел Кей, Р.Труелл, Б.Чик, С.Елбаум), франциялик (Е.Диелесан ва Д.Руайе), ўзбекистонлик (П.К.Хабибуллаев, С.З.Мирзаев, З.Т.Азаматов, В.Ф.Криворотов, Л.М.Сабиров, Ф.Р.Ахмеджанов, Д.И.Семенов) ва бошқа мутахассисларнинг ишлари тригонал ҳамда куб симметрияли кристалларининг эластик хусусиятларини экспериментал ва назарий ўрганишга бағишланган.

Россиялик олимлар томонидан пьезоэлектрик материалларда, жумладан, танталат литий ва ниобат литийда акустик тўлқинларнинг хусусиятларини, шунингдек, Ge, Si, InSb, MgO, KCl ва бошқаларни ўз ичига олган кўплаб куб кристаллардаги акустик йўқотишлар ҳамда ангармоник жараёнларнинг анизотропияси ўрганилган. Турли симметриядаги диэлектрик ва яримўтказгич кристалларининг сўниш механизмлари ва акустик хоссалари тадқиқ этилган. Хусусан, мисол тариқасида кварц кристалларидан фойдаланган ҳолда анизотроп материаллар учун Грюнайзен тензори биринчи марта кўриб чиқилган. Акустик тўлқинларнинг турли анизотроп тузилмалар ва кристалларда, шу жумладан, танталат ва литий ниобат кристалларида тарқалишини ўрганган франциялик олимларнинг тадқиқотларини таъкидлаш керак. Ўзбекистон олимлари физик акустика, акустоэлектроника ва акустооптика соҳасидаги тадқиқотларни ривожлантиришга катта ҳисса қўшдилар. Улар Брэгг ёруғлик дифракцияси ва Мандельштам – Бриллюэннинг сочилиш усулларида фойдаланган ҳолда бир қатор диэлектрик ва суюқ кристаллар ҳамда наносуюқликларнинг акустик хусусиятларини ўргандилар.

Ушбу кристалларнинг кўплаб эластик хусусиятлари ўрганилган бўлса-да, эластик хусусиятларнинг анизотропияси, айниқса, акустик тўлқинларнинг сўниш механизмлари, ангармоник константалари ва уларнинг

анизотропиясини аниқлайдиган батафсил тадқиқотлар деярли йўқ, ўрганилган кристалларда ва бу хусусиятлар бўйича мавжуд маълумотлар бир-бирига зиддир. Шу билан бирга, акустик тўлқинларнинг сўниш механизмлари ва кристаллардаги акустик хусусиятларнинг анизотропияси ҳақида билимлар уларнинг тадқиқот ҳамда ахборот тизимлари учун акустоэлектроник ва акустооптик қурилмаларда қўллашнинг технологик имкониятларини кенгайтириш учун зарурдир.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий тадқиқот муассасаси илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Ион-плазма ва лазер технологиялар институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг ОТ-Ф2-56 “Нодир элементларнинг суперион трифторидларида иссиқлик узатишнинг ички ҳаракати ва тўлқин шакли LnF_3 ” (2017-2020) мавзусида фундаментал лойиҳаси ва Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2021 йилнинг 13 июлдаги № ПФ-6260-сон Фармони билан тасдиқланган илмий ишлар дастурининг “Диэлектрик ва сегнетоэлектрик кристалларида эластик, фотоэластик ва суперион хоссаларининг нозичлиги ҳодисалари, фазавий ўтишлари ва анизотропияси” (2021-2024) мавзуси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади куб ва тригонал симметрияли баъзи кристалларда акустик характеристикалар анизотропия қонуниятларини ҳамда акустик тўлқинларнинг сўниш механизмларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

ниобат литий ва танталат литий ҳамда литий фтор ва натрий фтор кристалларида симметрия ўқлари бўйлаб юқори частотали акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўнишини акустик ҳамда акусто-оптик усуллар ёрдамида аниқлаш;

литий фтор ва натрий фтор куб кристалларида Грюнайзен тензорининг компоненталаридан фойдаланиб, эффектив ангармониклик доимийларининг фазовий дисперсиясини ўрнатиш;

литий ва натрий фторидларнинг куб кристалларидаги мавҳум эластиклик доимийларидан анизотропия параметрларини аниқлаш;

ниобат литий ва танталат литийнинг тригонал кристалларидаги пьезоактив акустик тўлқинларнинг сўниш қийматида диэлектрик йўқотишларнинг таъсир қилиш механизминини аниқлаш;

сегнетоэлектрик фазадан ўтиш ҳудудида литий ниобат ва танталат кристалларидаги акустик тўлқинларнинг тезлиги ҳамда сўнишининг ўзгариш қонуниятларини очиқ бериш.

Тадқиқотнинг объектини акустик тўлқинларнинг сўниш механизмлари, эффектив ангармониклик константалари ва ниобат литий ҳамда танталат литий ва литий ҳамда натрий фтор кристалларидаги акустик хусусиятларнинг анизотропия қонуниятлари ташкил этади.

Тадқиқотнинг предметини ниобат литий ва танталат литий, литий ва натрий фтор кристалларида юқори частотали акустик тўлқинларнинг тарқалиш тезлиги ҳамда сўниш коэффициенти ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари: материаллардаги акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўниш коэффициенти ўлчаш учун акусто-оптик ва импульс-интерференция усуллари.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

биринчи марта барча нуқтавий симметрия гуруҳлари куб кристаллари учун мавҳум эластик модулларининг анизотропия коэффициенти киритилган ва бу литий ҳамда натрий фтор кристалларидаги акустик тўлқинларнинг сўниш коэффициенти ва анизотропиясини яхши тавсифлаши аниқланган;

куб кристалларида Грюнайзен тензори ва унинг таркибий қисмларини аниқлашга янги ёндашув таклиф этилган, унинг ёрдамида эффектив ангармониклик константаларининг фазовий дисперсияси аниқланган, бу эса ушбу кристаллардаги акустик тўлқинлар сўнишининг кучли анизотропиясини тушунтиради;

пьезоактив акустик тўлқинлар учун ниобат ва танталат литийнинг марказий симметрик бўлмаган кристалларида қиймати 30 %га етиши мумкин бўлган диэлектрик йўқотишларнинг сўнишга ҳиссасини ҳисобга олиш кераклиги кўрсатилган;

фазавий ўтиш минтақасида тартиб параметрининг флуктуацияси туфайли фазавий ўтиш ҳудудида танталат литий кристалларида бўйлама акустик тўлқинларнинг сўниш механизмлари аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

ниобат литий ва танталат литий ҳамда литий фтор ва натрий фтор кристалларидаги акустик тўлқинларнинг минимал сўниши билан энг кам акустик йўқотишларга эришиладиган йўналишлари аниқланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўнишини ўлчаш учун яхши синовдан ўтган ўлчашнинг акустик ҳамда акусто-оптик усуллари, кўп миқдордаги тажриба натижалари ва уларнинг конденсацияланган муҳитлар физикасининг асосий қонунлари ҳамда асосий тамойилларига мувофиқлиги, шунингдек, бошқа муаллифларнинг баъзи олинган натижаларига мос келиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Натижаларнинг илмий аҳамияти шундан иборатки, мавҳум эластик константалар нуқтаи назаридан анизотропия параметрларини жорий этиш ҳар қандай симметриядаги куб кристалларда акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўниш коэффициенти анизотропиясини тасвирлаш имконини беради. Биринчи марта ўрганилган фазавий ўтиш минтақасида танталат литий кристалларидаги акустик тўлқинларнинг сўниш механизмлари ушбу кристалларда фазавий ўтиш пайтида акустик тўлқинлар сўнишининг аномал ҳароратга боғлиқлигини тушунтиради.

Амалий нуқтаи назардан, олинган натижалар ҳам марказий симметрик, ҳам марказий носентросимметрик куб кристалларда акустик тўлқинлар сўниш анизотропиясининг умумий характерини башорат қилиш ва улардаги ҳақиқий қурилмаларда фойдаланиш учун энг қулай кесимларни аниқлаш учун фойдали бўлиши мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Акустик тўлқинларнинг сўниши механизмларини ва кристаллардаги акустик хусусиятларнинг анизотропия қонуниятларини аниқлаш учун олинган натижаларга асосланиб:

барча нуқтавий симметрия гуруҳлари куб кристаллари учун мавҳум эластик модулларнинг киритилган анизотропия коэффиценти ЎзР ФА Материалшунослик институтида МРБ-АН-2019-17 “Қуёш элементлари учун кенг полосали композит акслантиришга қарши қопламаларни тадқиқ қилиш” (2019-2021) Ўзбекистон-Беларус лойиҳаси доирасида қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясининг 2022 йил 8 августдаги 2/1255-1863-сонли хати). Илмий натижалардан фойдаланиш қуёш элементларининг самарадорлигини ошириш учун акслантиришга қарши қопламаларни танлаш имконини берган;

Грюнайзен тензори ва унинг куб кристалларидаги компонентларини аниқлаш учун тақлиф этилган янги ёндашув ЎзР ФА Ядро физикаси институтида ОТ-Ф2-26 “Электронлар дастасида функционал нанотизимларнинг шаклланиш механизмлари” (2017-2019) фундаментал лойиҳаси доирасида литий фтор кристалларида атомларнинг ўртача квадратик силжиши, иссиқлик сиғими, самарали эластик доимийлари ва иссиқликдан кенгайиш коэффицентини ўрганишда фойдаланилган. (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2022 йил 8 августдаги 2/1255-1862-сонли хати). Илмий натижалардан фойдаланиш литий фтор кристалларининг механик хусусиятларининг кучли анизотропия механизмини тушунтиришга имкон берган;

Танталат литий кристалларидаги бўйлама акустик тўлқинларни сегнетоэлектрик фазадан ўтиш минтақасида сўнишининг маълум механизмлари, энг кам акустик йўқотишларга эришилган кристалли товуш ўтказгичларнинг йўналишидаги аниқланган қонуниятлардан Материалшунослик институтида МРБ-АН-2019-17 “Қуёш элементлари учун кенг полосали композит акс эттирувчи қопламаларни тадқиқ этиш” (2019-2021) Ўзбекистон-Беларус лойиҳаси доирасида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2022 йил 8 августдаги 2/1255-1863-сонли хати). Илмий натижалардан фойдаланиш ёритилиш коэффицентини ошириш учун ушбу кристалларнинг амалий бўлимларини танлаш мезонини аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация мавзуси бўйича олиб борилган тадқиқотларнинг асосий натижалари 8 та халқаро ва республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 12 та, жумладан, 3 та мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган нашрларда, шулардан, 1 таси хорижий журналларда чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация иши кириш, 4 боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация ҳажми 103 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида олиб борилган тадқиқотнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“Кристаллардаги акустик тўлқинлар назарияси”** деб номланган биринчи бобида тўлқинларнинг тезлиги ва сўнишига пьезоэлектрик таъсирнинг ҳиссасини ҳисобга олган ҳолда кристаллардаги акустик тўлқинлар назарияси келтирилган. Биринчи бобнинг алоҳида бўлимида ўрганилган кристалларни ўз ичига олган диэлектрик ва сегнетоэлектрик кристалларга хос бўлган асосий сўниш механизмлари кўриб чиқилади. Ахизер фонон-фонон механизми ва диэлектрик йўқотишларнинг акустик сўнишга таъсир қилиш механизми батафсил ўрганилган. Биринчи бобнинг учинчи бўлимида ўрганилаётган кристалларнинг акустик хусусиятларига оид адабиётлар ва маълумотлар келтирилган. Текширувдан шундай хулосага келиндики, литий ва натрий фтор кристаллари, шунингдек, ниобат литий ва танталат литийнинг эластик хоссаларига оид кўплаб адабиётларга қарамай, ҳамон улардаги акустик тўлқинларнинг сўниши анизотропияси ўрганилмаганлигича қолмоқда.

Диссертациянинг **“Экспериментал қурилмалар ва усуллар”** деб номланган иккинчи боби биринчи бўлимида ўрганилган намуналарнинг умумий тавсифи ва акустик тўлқинларнинг сўниши ва тезлигининг ҳароратга боғлиқ ўлчовларининг хусусиятлари берилган. Намуналар куб призмалар бўлиб, уларнинг юзлари кристаллофизик йўналишлар [100], [001] ва [110] бўйлаб 1 даража аниқлик билан йўналтирилган. Призмаларнинг ўлчамлари 1 см дан 2 см гача эди. Улардаги акустик тўлқинлар кварцдан тайёрланган пьезоэлектрик ўзгартиргичлар, мос равишда Х- ва Y-кесимлари, табиий частоталари 30 дан 50 МГц гача бўлган.

Акустик тўлқинларнинг хусусиятларини ўлчаш учун импульс – интерференция усуллари иккинчи бўлимда тасвирланган. Вильямс–Лэмбнинг такомиллаштирилган усули кўриб чиқилган, бу бир вақтнинг ўзида акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўнишини аниқлаш имконини беради. Усулнинг ўзига хос хусусияти – маълум бир вақт оралиғида очиладиган амплитуда селекторидир. Ўлчов тизимида икки қатор акустик импульслар ҳосил бўлади.

Ушбу импульслар кетма-кетлиги устма-уст қўйилганда, уларнинг умумий амплитудаси бу импульсларни тўлдирувчи тебранишлар орасидаги фазалар фарқига боғлиқ бўлиб, уни юқори частотали генераторнинг частотасини созлаш орқали ўзгартириш мумкин.

Сигнал амплитудаларининг интерференция нолларини ёки максимумларини кузатиб, акустик тўлқиннинг тезлигини аниқлаш мумкин:

$$V = 2L \cdot \Delta\nu, \quad (1)$$

бу ерда L – намуна узунлиги, $\Delta\nu$ – қарама-қарши фазадаги интерференциясига мос келадиган генераторнинг иккита частотаси орасидаги фарқ. Бундай ҳолда, сигналнинг амплитудаси ва вақтини танлаш туфайли тезликни аниқлашнинг аниқлиги $\sim 0,01\%$ ни ташкил қилади.

Сўниш коэффициенти α , қуйидаги ифодадан аниқланди:

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \cdot 20 \lg \frac{A_1}{A_2}, \text{ dB / см}, \quad (2)$$

бу ерда A_1 ва A_2 товуш импульсларининг кузатилган қаторида мос равишда биринчи ва иккинчи импульсларнинг амплитудалари.

Акустик хусусиятларни аниқлашнинг акусто-оптик усули ва акусто-оптик ўлчаш тизими бобнинг учинчи қисмида кўриб чиқилади. Ўлчов мосламаси $0,4\text{--}1,6$ ГГц частота оралиғида акустик тўлқинларни қўзғатиш учун акустик қисмдан ва ёруғлик ҳосил қилиш (тўлқин узунлиги $632,8$ нм) ҳамда дифракцияланган ёруғлик интенсивлигини ўлчаш учун оптик қисмдан иборат.

Акустик тўлқиннинг тезлиги Брэгг ёруғлик дифракция бурчаги θ_B акустик тўлқин тезлиги V ва унинг частотаси ν билан боғлиқ бўлган муносабатдан аниқланди:

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda_0 \cdot \nu}{2 \cdot V} \quad (3)$$

Қувватни пасайтириш коэффициенти деб аталадиган α сўниш коэффициенти қуйидаги муносабатдан аниқланади:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta t} \cdot 10 \lg \frac{I(x_1)}{I(x_2)}, \text{ dB / мкс} \quad (4)$$

бу ерда $I(x_1)$ ва $I(x_2)$ мос равишда акустик тўлқиннинг тарқалиш йўналиши бўйича x_1 ва x_2 нуқталарда дифракцияланган ёруғликнинг интенсивлиги.

Диссертациянинг “**Литий фтор ва натрий фтор куб кристалларининг акустик хоссалари**” деб номланган учинчи бобида литий фтор ва натрий фторнинг куб кристалларидаги акустик хоссалари ҳамда анизотропия параметрларини ўрганиш натижалари келтирилган.

Мазкур бобнинг “Литий ва натрий фторларнинг куб кристалларидаги тезлик анизотропияси ҳамда эффектив эластик доимийлар” номли биринчи бўлимида литий фтор (1-жадвал) ва натрий фтор (2-жадвал) кристалларида акустик тўлқин тезлиги ҳамда эффектив эластик доимийларни асосий кристаллографик йўналишлардаги $[100]$, $[110]$ ва $[111]$ хона ҳароратида ўлчаш натижалари келтирилган. Ушбу жадваллардаги акустик тўлқинларнинг сўниш

коэффициенты кийматлари 1 ГГц учун берилган. Эластиклик тензорининг мустақил компонентлари: c'_{11} , c'_{12} , c'_{14} , c''_{11} , c''_{12} , c''_{14} бўйлаб бўйлама ва кўндаланг акустик тўлқинларнинг $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ йўналишлардаги тезлиги ҳамда сўниши ҳақидаги маълумотлардан аниқланган. Эффектив эластик доимийлар c'_{eff} , ва c''_{eff} қуйидаги ифода ёрдамида аниқланди:

$$c_{eff} = c'_{eff} + i c''_{eff} = c'_{ijkl} \kappa_j \kappa_l \eta_i \eta_k + i c''_{ijkl} \kappa_j \kappa_l \eta_i \eta_k, \quad (5)$$

бу ерда κ_j ва η_i тўлқин вектори ва силжиш векторининг йўналтирувчи косинуслари.

1-жадвал

**Акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўниши, LiF кристалларида
эффектив ҳақиқий ва мавҳум эластик доимийлар**

q	η	$c_{эфф}$	V , $10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$c'_{эфф}$, $10^{10} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$	α , $\text{дБ} \cdot \text{мкс}^{-1}$	$c''_{эфф}$ $10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$
[100]	[100]	c_{11}	6.51	11.2	6.16	2.53
	[001]	c_{44}	4.89	6.32	1.21	0.28
		c_{12}		4.56		-0.42
[110]	[110]	$(c_{11} + c_{12} + 2c_{44})/2$	7.33	14.2	2.59	1.35
	[110]	$(c_{11} - c_{12})/2$	3.55	3.32	12.0	1.46
	[001]	c_{44}	4.89	6.32	1.21	0.28
[111]	[111]	$(c_{11} + 2c_{12} + 4c_{44})/3$	7.59	15.2	1.72	0.96
	[110]	$(c_{11} - c_{12} + c_{44})/3$	4.05	4.32	6.75	1.07

2-жадвал

**Акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўниши, NaF кристалларида
эффектив ҳақиқий ва мавҳум эластик доимийлар**

q	η	$c_{эфф}$	V , $10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$c'_{эфф}$, $10^{10} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$	α , $\text{дБ} \cdot \text{мкс}^{-1}$	$c''_{эфф}$ $10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$
[100]	[100]	c_{11}	5.86	9,63	14.0	4,95
	[001]	c_{44}	3.14	2.76	1.80	0.18
		c_{12}		2.42		-0.35
[110]	[110]	$(c_{11} + c_{12} + 2c_{44})/2$	5,60	8.79	7.70	2.48
	[110]	$(c_{11} - c_{12})/2$	3.59	3.61	20.0	2.65
	[001]	c_{44}	3.14	2.76	1.80	0.18
[111]	[111]	$(c_{11} + 2c_{12} + 4c_{44})/3$	5.51	8.50	5.32	1.66
	[110]	$(c_{11} - c_{12} + c_{44})/3$	3.44	3.32	15,0	1.83

Кристалларнинг эластик хусусиятларининг анизотропияси Грен-Кристоффел тенгламалари тизими ёрдамида ўрганилди:

$$(\Gamma_{ik} - \rho V^2 \delta_{ik}) \eta_k = 0 \quad (6)$$

бу ерда V – акустик тўлқин тезлиги, δ_{ik} – Кронеккер бирлик тензори, η_k – қутбланиш векторининг компонентлари ρ – кристаллнинг зичлиги. Грен-Кристоффел Γ_{ik} тензорининг компонентлари қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$\Gamma_{ik} = c_{ijkl} K_j K_l, \quad (7)$$

Грен-Кристоффел тензорининг Γ'_{ik} ҳақиқий компонентларини топиш учун (7) ифодада c'_{ijkl} эластик доимийларнинг ҳақиқий компонентларини алмаштириш керак ва шунга мос равишда Γ''_{ik} тасаввур компонентларини топиш учун c''_{ijkl} доимийларининг мавҳум компонентларидан фойдаланиш лозим. Эффе́ктив ҳақиқий эластик доимийлар c'_{ijkl} акустик тўлқинларнинг тезлиги V қийматидан аниқланди:

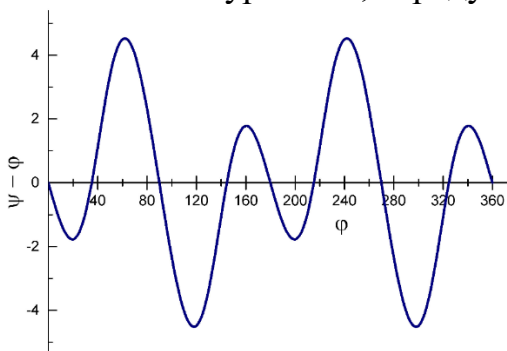
$$c'_{\alpha\beta\gamma\delta} = \rho V^2 \quad (8)$$

Умумий ҳолатда тўлқин нормал векторларининг k ва қутбланиш η_i йўналишлари бир-бирига тўғри келмайди. Хусусан, (110) текисликдаги квази бўйлама тўлқинлар учун $[110]$ ўққа нисбатан тўлқин векторининг йўналиши ϕ бурчакка ўзгарганда, ψ қутбланиш векторининг бу ўқдан оғиш бурчаги тангенци, қуйидаги муносабатдан аниқланади:

$$\psi = \arctg \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left(\frac{\Gamma'_{12} \Gamma'_{13} - \Gamma'_{23} (\Gamma'_{11} - \rho V^2)}{\Gamma'_{23} \Gamma'_{13} - \Gamma'_{12} (\Gamma'_{33} - \rho V^2)} \right). \quad (9)$$

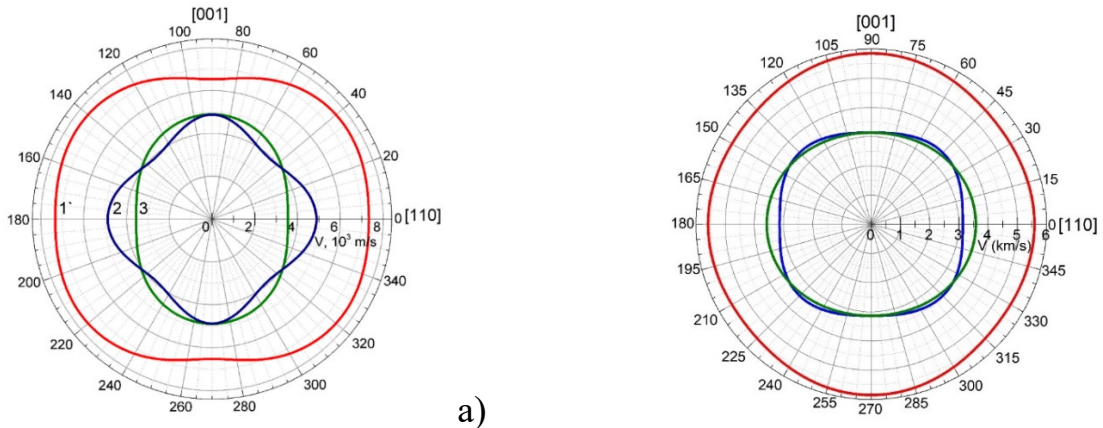
бу ерда Γ'_{ik} Грен-Кристоффел тензорининг ҳақиқий компонентлари (7).

1-расмда (110) текисликдаги квази бўйлама тўлқинлар учун қутбланиш бурчакларини ψ ҳисоблаш натижалари - қутбланиш оғишининг ушбу текисликдаги тўлқин вектори йўналишига боғлиқлиги кўрсатилган. Кўриниб турибдики, бу текисликда учта йўналиш $[110]$, $[001]$ ва $[111]$ бўлиб, улар бўйлаб соф бўйлама тўлқинлар тарқалади ҳамда қутбланиш векторининг тўлқин векторидан максимал оғиш-бурчаги 4,5 градусни ташкил қилади.



1-расм. NaF кристалларида (110) текисликдаги квази бўйлама тўлқинда қутбланиш йўналишининг тўлқин вектори йўналишидан четланиши

Симметрия текисликларида акустик тўлқинлар тезлигининг ориентацион боғлиқлиги характерли юзалар кўринишида ифодаланган. Мисол тариқасида, 2-расмда литий ва натрий фтор кристалларидаги тезлик юзаларининг (110) текислиги бўйича кесими кўрсатилган. Бу текисликда литий фтор кристалларидаги соф кўндаланг тўлқинлар учун энг кучли тезлик анизотропияси кузатилади. Бунда $V_{max}/V_{мин}=1,43$ нисбат. Натрий фтор кристалларида тезлик анизотропияси анча заифдир. Иккала кристалл ўртасидаги кучли фарқ, шунингдек, улар учун ишораси билан фарқ қилувчи ҳақиқий эластик доимийлар нуқтаи назаридан анизотропия параметрида ҳам бўлади.



2-расм. LiF (а) ва NaF (б) кристалларидаги фаза тезлиги юзаларининг (110) текислиги бўйича кесими. 1 – квази бўйлама, 2 – ярим кўндаланг, 3 – соф кўндаланг акустик тўлқинлар

Учинчи бобнинг иккинчи бўлими “Литий фтор ва натрий фтор кристалларидаги акустик тўлқинларнинг сўниш анизотропияси ва анизотропия параметрлари” деб номланиб, бу кристалларда акустик тўлқин сўниш анизотропияси ўрганилди. Кристаллографик ўқлар [100], [110] ва [111] учун олинган акустик тўлқинларнинг сўниши ҳамда ҳақиқий ва мавҳум эластик доимийларни аниқлаш натижалари 3-жадвалда келтирилган.

$\omega\tau \ll 1$ (ω – акустик тўлқинларнинг частотаси, τ – иссиқлик фононларнинг релаксация вақти) соҳасида акустик тўлқинларнинг сўниши Ахиезер механизми бўйича содир бўлиши кўрсатилган ва қуйидаги ифода ёрдамида ҳисобланади:

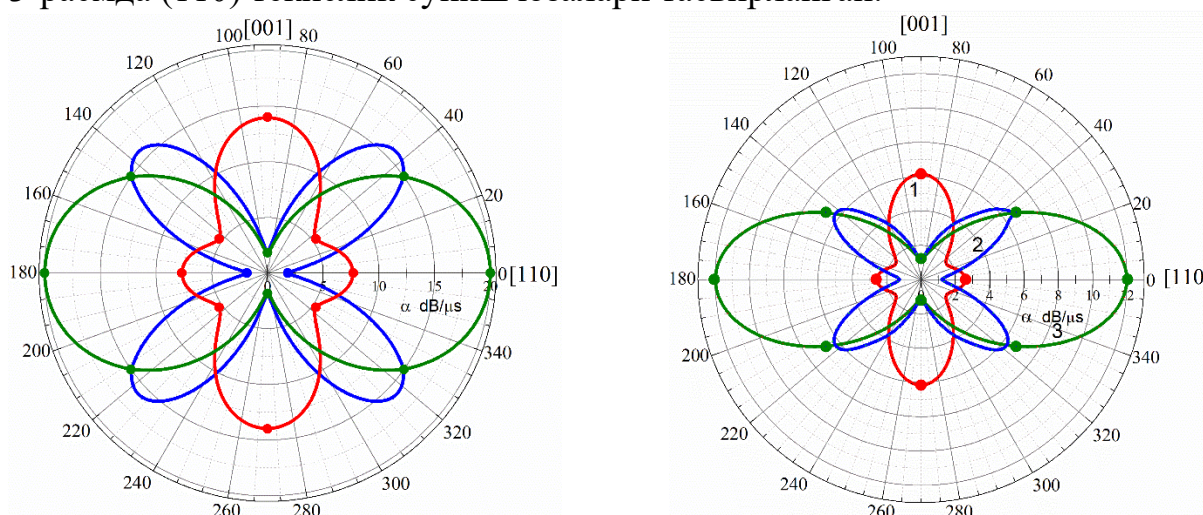
$$\alpha = \frac{1}{2} \omega \frac{c''_{eff}}{c'_{eff}}, \quad (10)$$

3-жадвал ва (10) формуладаги маълумотларга асосланиб, литий ва натрий фтор кристалларидаги текисликлар бўйича акустик сўниш юзаларнинг кесимлари тузилган.

LiF ва NaF кристалларида эффектив ҳақиқий ва мавҳум эластик доимийлар ҳамда акустик тўлқинларнинг сўниши

q	η	α, дБ·мкс ⁻¹		c' _{эфф} , 10 ¹⁰ Н·м ⁻²		c'' _{эфф} 10 ⁷ Н·м ⁻²		γ _{эфф}	
		LiF	NaF	LiF	NaF	LiF	NaF	LiF	NaF
[100]	[100]	6.16	14	11.2	9,71	2.53	4.95	2.53	3.42
	[001]	1.21	1.8	6.32	2.80	0.25	0.18	1.03	0.80
[110]	[110]	2.59	10	14.2	8.87	1.35	2.48	1.85	2.55
	[110]	12.0	20	3.32	3.64	1.46	2.65	2.35	3.22
	[001]	1.21	1.8	6.32	2.80	0.28	0.18	1.03	0.84
[111]	[111]	1.72	6.5	15.2	8,59	0.96	1.66	1.56	2.14
	[110]	6.75		4.32	3.36	1.07	1.83	2.02	2.75

(110) текислиги билан натрий фтор ва литий фтор кристалларида, 3-расмда (110) текислик сўниш юзалари тасвирланган.



3-расм. NaF ва LiF кристалларида (110) тексликдаги квази-бўйлама (1), квази-кўндаланг (2) ва соф кўндаланг (3) акустик тўлқинларнинг сўниш юзалари. Нуқталар тажриба натижалари

Акустик тўлқинлар тезлигининг анизотропияси ва эластик хусусиятларнинг анизотропияси ҳақиқий эластик доимийлар $\Delta c'$ бўйича анизотропия параметри билан яхши тавсифланади:

$$\Delta c' = 2c'_{44} - (c'_{11} - c'_{12}), \quad (11)$$

Ушбу параметрга ўхшаб, сўниш анизотропиясини тавсифлаш учун биз $\Delta c''$ мавҳум эластик доимийлари учун анизотропия параметрини киритдик:

$$\Delta c'' = 2c''_{44} - (c''_{11} - c''_{12}), \quad (12)$$

Кристалларнинг акустик хусусиятларининг анизотропиясини тавсифлаш учун куб кристаллар учун қуйидагига тенг бўлган ҳақиқий акустик анизотропия омили A' қўлланилади:

$$A' = \frac{c'_{11} - c'_{12}}{2c'_{44}} = \left(\frac{V_{110}^S}{V_{001}^S} \right)^2, \quad (13)$$

Шунингдек, мавҳум эластик доимийлар бўйича анизотропия параметри ўрнига биз томондан биринчи марта киритилган мавҳум акустик анизотропия омилидан A'' фойдаланиш мумкин:

$$A'' = \frac{c''_{11} - c''_{12}}{2c''_{44}} = \frac{\alpha_{110}^S}{\alpha_{001}^S} \left(\frac{V_{110}^S}{V_{001}^S} \right)^2 = \frac{\alpha_{110}^S}{\alpha_{001}^S} A', \quad (14)$$

Бу барча анизотропия параметрлари тезлик анизотропиясининг табиатини ва куб кристалларидаги акустик тўлқинларнинг сўнишини таҳлил қилиш имконини беради. Шундай қилиб, $\Delta c''$ ёки A'' мавҳум эластик доимийлардан анизотропия параметрларини билган ҳолда, акустик тўлқинларнинг энг кам сўниши бўлган йўналишларни тахмин қилиш мумкин. (13) ва (14) муносабатлардан кўриниб турибдики, бу параметрларни аниқлаш учун $[110]$ бўйлаб турли хил қутбланишга эга бўлган иккита кўндаланг тўлқиннинг сўниши ва тезлигини ўлчаш ҳамда уларни ушбу муносабатлардан ҳисоблаш кифоя.

4-жадвалда LiF ва NaF кристалларидаги анизотропия параметрларининг ҳақиқий ва мавҳум қисмлари ҳамда акустик анизотропия омиллари келтирилган. Кўриниб турибдики, улар мусбат ва манфий анизотропия параметрларига эга бўлган кристалларга эга.

4-жадвал

Эластик анизотропиянинг таъсир кўрсатиш параметрлари куб симметрия кристалларидаги муҳим ва мавҳум эластик доимийлар

Кристалл	$\Delta c'$	$\Delta c''$	A'	A''
LiF	+5.83	-2.45	0.54	5.36
NaF	-1.69	-4.94	1.31	14.5

Куб кристалларда акустик тўлқинларнинг сўниши бўйича тажриба маълумотларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, анизотропия параметрларини билиш, манфий мавҳув акустик анизотропия параметрига эга бўлган куб кристалларида акустик тўлқинларни сўниши учун қуйидаги тенгсизликларни аниқлайдиган мезонни киритиш имконини беради.

$$\alpha_{[100]}^L > \alpha_{[110]}^L > \alpha_{[111]}^L \quad (15)$$

$$\alpha_{[110]}^{QS} > \alpha_{[111]}^S > \alpha_{[100]}^S = \alpha_{[110]}^S \quad (16)$$

бу ерда пастки индекслар тўлқин тарқалиш йўналишини кўрсатади. Бу муносабатлар LiF ва NaF кристаллари учун амал қилади, улар учун бу параметр манфий ва акустик анизотропия омили бирдан анча катта.

Шундай қилиб, мавҳум эластик доимийлардан, (15) ёки (16) муносабатлардан анизотропия параметрларини таҳлил қилиш асосида бўйлама ва кўндаланг акустик тўлқинларнинг энг кам сўниши кузатиладиган йўналишларни тахмин қилиш мумкин.

Учинчи бобнинг учинчи бўлими “Акустик сўниш анизотропияси ва литий ва натрий фтор кристалларидаги Грюнайзен тензори” деб номланиб, акустик сўниш анизотропиясини ва литий ҳамда натрий фтор кристалларида Грюнайзен тензорини ўрганиш натижаларини тақдим этади. Ахиезер назариясига кўра, сўниш ифодасини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\alpha = \gamma^2 \frac{\beta \cdot 8.68 \cdot \lambda T \omega^2}{2 \rho V^2 V_D^2}, \quad (17)$$

бу ерда β – кўпайтирувчи, T – ҳарорат, λ – иссиқлик ўтказувчанлик, γ – эффектив Грюнайзен доимийси, V_D – Дебай тезлиги. Кристаллардаги сўнишнинг экспериментал қийматлари ва (17) ифодадан фойдаланиб, биз [100], [110] ва [111] йўналишлари учун эффектив Грюнайзен доимийларини аниқладик, улар 3-жадвалда келтирилган. (10) ва (17) ифодалар ёрдамида биз Грюнайзен эффектив доимийсини қуйидаги тенглама орқали ифодалашимиз мумкин:

$$\gamma_{\text{эфф}} = \left(\frac{c''_{\text{эфф}} \cdot V_D^2}{2 \cdot \lambda \cdot T \cdot \omega} \right)^{1/2}. \quad (18)$$

(18) муносабат биринчи марта биз томонимиздан киритилди ва бўйлама ҳамда кўндаланг тўлқинлар учун эффектив Грюнайзен доимийларини ушбу муносабатдан γ_{ik} тензорининг мустақил компонентлари орқали аниқлаш имконини беради:

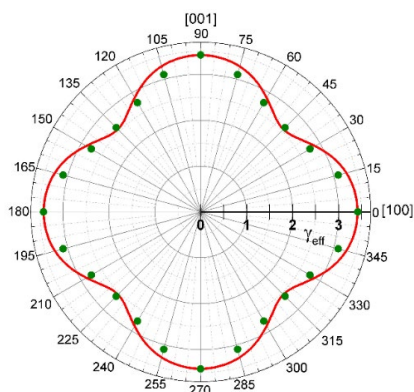
$$\gamma_{\text{эфф}} = \gamma_{ik} \eta_i \kappa_k. \quad (19)$$

Бундай ёндашув мумкин, чунки куб кристалларида тўртинчи тартибли симметрия ўқларига тўғри келадиган барча йўналишлар учун, хусусан, [100] учун эффектив Грюнайзен доимийси қиймати тензор компоненти γ_{11} бўлган бўйлама тўлқинлар учун мос келади ва кўндаланг тўлқинлар учун γ компонент билан γ_{12} . Натижада, натрий фтор кристалларида Грюнайзен акустик тензорининг компонентлари γ_{11} ва γ_{12} мос равишда 3,42 ҳамда -0,81 эканлиги аниқланди. Литий фтор кристалларида бу компонентлар γ_{11} ва γ_{12} мос равишда 2,53 ва -0,95 га тенг.

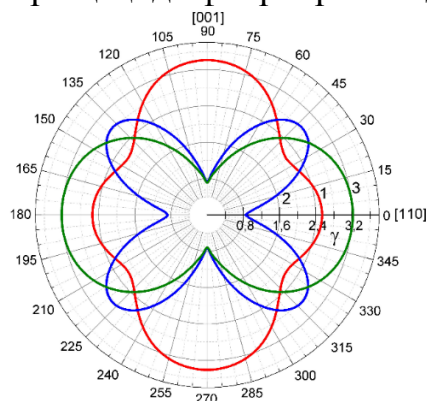
Грюнайзен акустик тензор компонентларининг γ_{11} ва γ_{12} биз томондан олинган қийматлари ҳамда (20) ифода ёрдамида биз баъзи кристаллографик текисликдаги квази бўйлама тўлқинлар ёки квази кўндаланг тўлқинлар учун эффектив Грюнайзен доимийсининг ориентация боғлиқлигини аниқлашимиз мумкин. Ўрганилган кристаллар (001) текисликда квази бўйлама акустик тўлқинларнинг тарқалиши пайтида натрий фтор кристалларининг бундай боғлиқлиги 4-расмда кўрсатилган. Узликсиз чизик (19) формула бўйича ҳисоблаш натижасини, нуқталар орқали ҳисоблаш натижасини кўрсатади. (20) ифода ёрдамида Грюнайзен тензорининг компонентларини аниқлаш мумкин.

Кўриниб турибдики, икки усулда аниқланган эффектив доимийлар бирига яхши мос келади. Натрий фтор кристалларида (110) текисликда тарқаладиган барча акустик тўлқинлар учун эффектив Грюнайзен доимийсининг бир хил ориентация боғлиқлиги 5-расмда кўрсатилган.

Диссертациянинг “Танталат литий ва ниобат литий тригонал кристалларининг акустик хусусиятлари” деб номланган тўртинчи бобида ниобат литий ва танталат литий кристалларида, шу жумладан сегнетоэлектрик фаза минтақасида акустик тўлқинларнинг хусусиятларини сўниш ва анизотропия механизмларини ўрганиш натижалари ҳақида фикр юритилади.



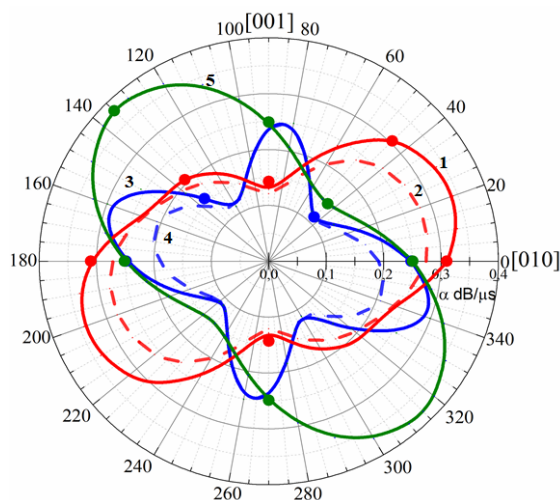
4-расм. Натрий фтор кристалларидаги (001) текисликдаги квази бўйлама тўлқинлар учун эффектив Грюнайзен доимийсининг йўналишларга боғлиқлиги



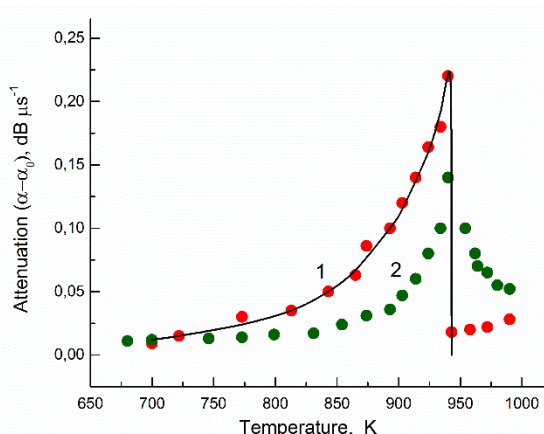
5-расм. Натрий фтор кристалларидаги эффектив Грюнайзен доимийси юзаларининг квази-бўйлама (1), квази-кўндаланг (2) ва соф кўндаланг акустик тўлқинлар (3) учун (110) текислик билан кесмаси

Тўртинчи бобнинг биринчи бўлими “Диэлектрик қутбланиш билан деформациянинг пьезоэлектрик бирикмасидан келиб чиққан акустик тўлқиннинг сўниши” деб номланган бўлиб, у ниобат литий ва танталат литий кристалларида пьезоактив тўлқинларнинг сўнишини ўрганишга бағишланган. Ушбу акустик тўлқинларнинг сўниши учун диэлектрик йўқотишлар таъсирини ҳисобга олиш керак, айниқса электромеханик боғланиш коэффиценти жуда катта бўлган LiNbO_3 кристаллари учун. Бундай ҳисоб-китоблар (100) текисликда тарқаладиган бўйлама ва кўндаланг акустик тўлқинлар учун қилинган ҳамда акустик тўлқинлар сўнишининг ориентацияга боғлиқлиги кўринишида 6-расмда келтирилган. Ҳисоб-китобларда диэлектрик йўқотишларнинг эластик доимий тензорнинг мавҳум компонентларига ва шунинг учун сўниш қийматига қўшган ҳиссаси ҳисобга олинган. Расмдан кўриниб турибдики, LiNbO_3 кристалларида кучли сўниш анизотропиядан ташқари ($\alpha_{\text{max}}/\alpha_{\text{min}} > 2,5$) ўзгариш мавжуд. Диэлектрик йўқотишларнинг сўниш қийматига ва анизотропияга сезиларли ҳиссаси мавжуд. Хусусан, квази бўйлама акустик тўлқинлар учун бу тўлқинларнинг сўнишига максимал ҳисса умумий сўнишнинг 25 %гача бўлиши мумкин.

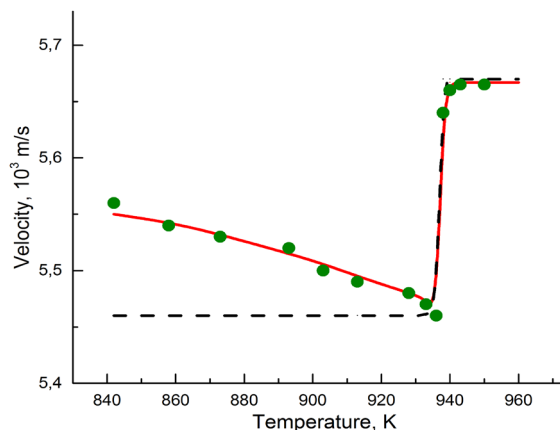
Тўртинчи бобнинг иккинчи бўлими “Танталат литий кристалларидаги фазавий ўтиш минтақасида акустик тўлқинларнинг сўниши механизмлари” деб номланиб, сегнетоэлектрик фаза ўтиш яқинида танталат литий кристалларида бўйлама ва кўндаланг эластик тўлқинларнинг сўниши механизмларини ўрганиш натижаларига бағишланган. X ва Z ўқлари бўйлаб LiTaO_3 кристалларида 150 МГц частотада акустик тўлқинларнинг тезлиги ва сўнишини ўлчаш натижалари 7-расмда кўрсатилган, бу ерда узлуксиз чизиклар назарий формулалар ёрдамида ҳисоб-китоблар натижаларини кўрсатади.



6-расм. LiNbO_3 кристалларидаги (1, 2) бўйлама ва (3, 4, 5) кўндаланг тўлқинларнинг акустик сўниш юзларининг (100) текислик бўйича кўндаланг кесими. Диэлектрик йўқотишларнинг таъсирини ҳисобга олган ҳолда 1 ва 3. 2 ва 4 ҳисобга олинмаган



a)



b)

7-расм. 150 МГц частотада X ўқи (7a1) ва Z ўқи (7a2) бўйлаб бўйлама акустик тўлқинларнинг тезлик (б) ва сўнишининг ҳароратга боғлиқлиги

Кўриниб турибдики, ўрганилаётган тўлқин турларининг сўниши ҳарорат оралиғида ($T_c - T$) ~ 80–150 К гача бўлган ўтиш ҳароратига яқинлашганда тез ортиб боради. Бунда бўйлама акустик тўлқинларнинг сўниши сегнетоэлектрик ва параэлектрик фазалардаги X ўқи, Z ўқи бўйлаб бўйлама тўлқинлар, Кюри ҳароратига нисбатан асимметрик (7a-расм). Ушбу тўлқинларнинг тезлиги учун

хам фарқ кузатилади. Агар Z ўқи бўйлаб акустик тўлқинларнинг тезлиги Кюри ҳарорати ҳудудида аномалияларга эга бўлмаса, X ўқи бўйлаб бўйлама ва кўндаланг тўлқинларнинг тезлиги сегнетоэлектрик фазадан параэлектрик фазага ўтиш пайтида сакрашга учрайди (7б -расм).

Танталат литий кристаллари параэлектрик фазада пьезоэлектрик таъсирга эга эмас ва бу фазада акустик тўлқинларнинг қутубланиши билан боғланиши X , Y ва Z ўқларида бўйлама акустик тўлқинлар учун кузатиладиган электростриктив таъсир билан белгиланади ва фазавий ўтиш нуқтаси яқинида бўйлама акустик тўлқинлар сўнишининг аномал кучайиши Ландау-Халатников релаксация назарияси билан тавсифланиши мумкин. Ушбу механизмга кўра, акустик тўлқинларнинг ўтиш ҳарорати T_c яқинида сўнишининг кучайиши электростриктив ўзаро таъсир туфайли акустик тўлқин томонидан қўзғатилган спонтан қутбланишнинг термодинамик флуктуациясининг релаксация вақтининг кескин ошиши билан боғлиқ.

Акустик ва қутбланган тўлқинларининг электростриктив ўзаро таъсирини икки қисмга бўлиш мумкин – релаксацион ва флуктуацион. Акустик тўлқинларнинг спонтан қутбланиш ($g_{relax} \sim P_0 \delta P$) билан ўзаро таъсири туфайли релаксацион ҳиссаси фазавий ўтиш нуқтасига ($T \rightarrow T_c$ ($T < T_c$)) яқинлашганда кескин ортади ва T_c дан юқори ҳароратда бирдан нолга тушади, бу ерда $P_0 = 0$. Бу, шунингдек, акустик тўлқиннинг тарқалиш йўналишига ҳам кучли боғлиқ. Шу билан бирга, эластик тўлқинларнинг $g_{fluct} = \delta P^2$ иссиқлик флуктуацияси қутбланишнинг ўзаро таъсирдан келиб чиқадиган флуктуация ҳиссаси T_c нуқтада симметрик максималга эга бўлиши керак.

Фазавий ўтиш ҳарорати яқинидаги кристалларнинг термодинамик потенциал назариясининг тенгламасидан фойдаланиб, электромеханик боғланиш туфайли акустик тўлқин томонидан индукция қилинган ΔP_z ва ΔU_{ii} кийматлари қуйидаги муносабатлар билан ифодаланади.

$$\Delta P_z \text{ и } \Delta U_{ii} \sim \exp [i (\omega t - q \cdot r)].$$

Расмда тартиб параметрини ўзгартириш учун тенгламани олиш мумкин

$$\Delta P_z = - \frac{2LP_{z0} \tau (g_{31}u_{xx} + g_{33}u_{zz})}{1 + \omega^2 \tau^2} (1 - i\omega\tau). \quad (20)$$

Бу ерда τ релаксация вақти маъносини билдиради ва қуйидагича ифодаланади

$$\tau = \frac{1}{2aL} (T_c - T)^{-1}. \quad (21)$$

Ландау-Халатников механизми ёрдамида акустик тўлқинларнинг сўнишини ҳисоблашнинг стандарт методологиясидан фойдаланиб, мос равишда X ва Z ўқлари бўйлаб тарқаладиган бўйлама акустик тўлқинларнинг сўниш коэффициенти учун ифодалар олинади.

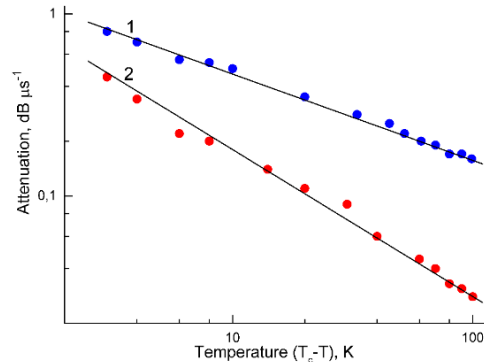
$$\alpha_{L_x} = \frac{g_{31}^2 \omega^2}{c_{11} a \beta L} (T_c - T)^{-1} \quad (22)$$

(22) ифода $\omega\tau \ll 1$ шarti остида амал қилади ҳамда X ўқи бўйлаб бўйлама тўлқинлар учун LiTaO_3 кристалларида ўтиш нуқтасига яқинлашганда сўнишнинг кучайиши кузатилиши кераклигини кўрсатади. Тажрибага кўра, X ўқи бўйлаб бўйлама тўлқинларнинг фазавий ўтиш яқинида сўниши квадратик

қонун бўйича частотага қараб ўзгаради, Z ўқи бўйлаб бўйлама тўлқинларнинг сўниши эса частотага чизиқли боғлиқдир.

8-расмда Z ва X ўқлари бўйлаб бўйлама акустик тўлқинлар сўнишининг $(T_c - T)$ логарифмик шкала бўйича боғлиқликлари кўрсатилган. Улар мумкинлиги аниқ қуйидаги қонуниятлар сифатида тахмин қилинади: X ўқи бўйлаб бўйлама тўлқинлар учун $\alpha = b_1 \cdot (T_c - T)^{-1}$, Z ўқи бўйлаб бўйлама тўлқинлар учун $\alpha = b_2 \cdot (T_c - T)^{-1/2}$ каби бўлади.

Бинобарин, X ўқи бўйлаб бўйлама тўлқинлар сўнишининг ҳароратга боғлиқлиги ҳам Ландау-Халатников механизмига яхши мос келади. Ушбу натижаларга асосланиб, биз LiTaO_3 кристаллари учун қутбланиш релаксация



8-расм. X ва Z ўқлари бўйлаб бўйлама акустик тўлқинлар сўнишининг фазавий ўтишга яқинлашиш даражасига боғлиқлиги $(T_c - T)$

вақтини тахмин қилдик, бу $2,3 \cdot 10^{-12}$ с бўлиб чиқди, бу триглицин сульфат кристаллариникидан тахминан кичикроқ катталиқ тартибидир.

Бу X ўқи бўйлаб, фазавий ўтиш ҳудудида бўйлама тўлқинлар сўнишининг нисбатан кичик ўсишини тушунтиради (7а-расм). Фазавий ўтиш пайтида бу тўлқинлар тезлигининг кузатилган боғлиқлигини тушунтириш учун (7б-расм) Ландау-Халатников назариясидаги термодинамик потенциални ёйилмасидаги учинчи ифодани ҳисобга олиш керак:

$$\Phi = \frac{1}{2\chi} P_z^2 + \frac{1}{4} \beta P_z^4 + \frac{1}{6} \gamma P_z^6 + g_{31} U_{xx} P_z^2 + g_{33} U_{zz} P_z^2 \quad (23)$$

Унда фазавий ўтиш пайтида тезликнинг ўзгариш ифодаси қуйидаги шаклга эга бўлади:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{g_{31}^2}{c_{11} [\beta^2 + 4a\gamma(T_c - T)]^{1/2}} \quad (24)$$

Адабиётдан маълум бўлган, a , β ва γ коэффициентларининг қийматларини (24) га қўйиб, ҳароратга боғлиқ қуйидаги тенгламани оламиз.

$$\frac{\Delta V}{V} = 7 \cdot 10^{-3} \frac{1}{[1 + 0.0088(T_c - T)]^{1/2}} \quad (25)$$

(25) формула фазавий ўтиш вақтида X ўқи бўйлаб бўйлама тўлқинлар тезлигининг бир текс ўзгаришини яхши тасвирлайди (7б-расмдаги эгри **чизик**).

Шу билан бирга, Z ўқи бўйлаб бўйлама акустик тўлқинларнинг сўниш аномалиялари уларнинг тартиб параметри билан ўзаро таъсиридан келиб чиқмайди. Ушбу тўлқинлар учун сўнишга асосий ҳисса уларнинг

электростриктив механизми туфайли боғланган зарядлар билан ўзаро таъсирдан келиб чиқиши мумкин. Натижада, сўнишнинг максимали диэлектрик йўқотиш чўққисига боғлиқ бўлиши мумкин:

$$\Delta\alpha = \frac{\omega}{2\rho V^2} \frac{e_{eff}^2}{\epsilon'} \frac{tg\delta}{1+tg\delta^2} \quad (26)$$

Бундай ҳолда, фазавий ўтиш яқинидаги акустик тўлқинлар сўнишининг частотага боғлиқлиги чизиқли бўлиши керак, бу ҳақиқатан ҳам тажрибаларда кузатилади.

ХУЛОСА

“Кубик ва тригонал симметрияли кристалларда акустик тўлқинларнинг сўниш механизмлари ва акустик хоссаларининг анизотропияси” мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертация ишининг натижалари асосида қуйидаги хулосалар келтирилади:

1. Биринчи марта эластиклик тензорининг барча мустақил ҳақиқий ва мавҳум компонентлари комплекс тарзда аниқланди ҳамда литий фтор ва натрий фторнинг куб кристалларида сўнишнинг характерли юзалари қурилди.
2. Грюнайзен тензорнинг компонентларини ва самарали ангармониклик доимийларини аниқлашга янги ёндашув таклиф қилинган ҳамда самарали Грюнайзен доимийси ва акустик сўниш анизотропияси ўртасида боғлиқлик ўрнатилган.
3. Биринчи марта натрий фтор ва литий фторнинг куб кристаллари учун Грюнайзен тензорининг компонентлари аниқланди, унинг ёрдамида самарали ангармониклик доимийларининг фазовий дисперсияси бу кристалларда акустик сўнишнинг кучли анизотропиясини тушунтириши кўрсатилди.
4. Пьезоактив акустик тўлқинлар учун ниобат литий ва танталат литийнинг марказий симметрик бўлмаган кристалларида диэлектрик йўқотишларнинг сўнишга ҳиссасини ҳисобга олиш кераклиги кўрсатилган, уларнинг қиймати 25 %га етиши мумкин.
5. Литий танталат кристалларида X ўқи бўйлаб бўйлама акустик тўлқинларнинг фазавий ўтиш яқинида акустик тўлқинларнинг сўнишидаги аномал ўзгаришлар квадратик қонун бўйича частотага боғлиқ ва Ландау-Халатников механизми билан яхши изоҳланиши аниқланди.
6. Z ўқи бўйлаб бўйлама тўлқинларнинг тартиб параметри билан чизиқли муносабатига қарамасдан, фазавий ўтиш вақтида бу тўлқинларнинг аномал сўниши Ландау-Халатников релаксация механизмига бўйсунмайди ва фазавий ўтиш нуқтасида максимал диэлектрик йўқотишлар туфайли бўлиши мумкинлиги кўрсатилган. Бунда ўтиш яқинидаги сўниши бўйлама тўлқинларнинг частотага боғлиқлиги чизиқли бўлиши керак, бу аслида тажрибада кузатилади.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КУРБАНОВ ЖАХОНГИР ОЧИЛОВИЧ

**МЕХАНИЗМЫ ЗАТУХАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН И
АНИЗОТРОПИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
В КРИСТАЛЛАХ КУБИЧЕСКОЙ И ТРИГОНАЛЬНОЙ СИММЕТРИИ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам**

Ташкент – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером № B2022.1.PhD/FM683

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Ахмеджанов Фархад Рашидович
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Бахрамов Сагдулла Абдуллаевич
доктор физико-математических наук, профессор, академик

Азаматов Закиржон Тахирович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

**Ташкентский государственный технический
университета имени И.А. Каримова**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2022 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ; тел.: (+998) 71-289-31-41; факс: (+998) 71-289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный № _____). Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ. Тел. (+99871) 289–31–19).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2022 г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2022 г.)

М.Ю. Ташметов
председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

О.Р. Тожибоев
ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученых степеней, PhD.ф.-м.н.,
старший научный сотрудник

Э.М. Турсунов
председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире большая группа кристаллов кубической и тригональной симметрии по совокупности физических характеристик и технологических параметров широко используется в промышленности и технике в качестве рабочих сред в акустооптических и акустоэлектронных устройствах. В частности, одними из наиболее востребованных для создания приборов и устройств акустоэлектроники являются кристаллы ниобата и танталата лития, фторидов лития и натрия и алюмоиттриевого граната. Так, монокристаллы ниобата и танталата лития имеют широкий диапазон прозрачности (0,35– 6,0 мкм), и обладают достаточно большим двулучепреломлением, что позволяет использовать их в качестве активной рабочей среды в акустооптических электронно-перестраиваемых фильтрах, акустооптических дисперсионных линиях задержки и акустооптических преобразователях для управления оптическим излучением. Одним из наиболее существенных факторов, ограничивающих частотный диапазон применения кристаллов в акустоэлектронных и акустооптических приборах, является затухание акустических волн. Поэтому одной из принципиальных задач является определение направления с минимальным затуханием, то есть поиск таких ориентаций кристаллических звукопроводов, при которых достигаются наименьшие акустические потери.

В настоящее время в мире исследование анизотропии упругих свойств кристаллов представляется также важным в интересах многих задач нелинейной акустики. Такие исследования помимо фундаментального интереса важны для определения наиболее эффективных срезов этих кристаллов, широко применяемых в качестве рабочих сред в различных устройствах обработки информации. Получение фундаментальных знаний о механизмах затухания акустических волн и закономерностях анизотропии упругих свойств, а также прогнозирование изменения этих свойств с изменением направления распространения акустических волн, несомненно, является актуальной задачей физики конденсированного состояния.

В последние годы в Республике Узбекистан уделяется большое внимание фундаментальным исследованиям в области материаловедения – поиску новых материалов и изучению свойств уже известных материалов, включая свойства диэлектрических, пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических кристаллов, используемых в различных отраслях экономики страны. Направления этих фундаментальных и прикладных исследований имеют большое значение для развития науки и наукоемкого производства в Узбекистане и отражены в Стратегии² развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.

² Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 гг.» от 28 января 2022 г.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, в определенной мере соответствуют задачам, обозначенным в Указах и Постановлениях Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 года, № УП-3012 «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017-2021 годы» от 26 мая 2017 года, № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данном направлении.

Соответствие исследования основным приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в республике II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Исследованию упругих свойств кристаллов тригональной и кубической симметрии посвящен ряд экспериментальных и теоретических работ ведущих ученых мира, в том числе российских (Ю.В. Гуляев, Б.Д. Зайцев, И.Е. Кузнецова, В.В. Проклов, В.В. Леманов, Н.К. Юшин и др.), американских (Самуэл Ки, Р.Труэлла Б. Чик, Ч. Эльбаум и др.), французских (Э. Дьелесан и Д. Руайе), узбекистанских (П.К. Хабибуллаев, С.З. Мирзаев, З.Т. Азаматов, В.Ф. Криворотов, Л.М. Сабиров, Ф.Р. Ахмеджанов, Д.И. Семенов и др.) и других.

Российскими учеными были исследованы характеристики акустических волн в пьезоэлектрических материалах, включая танталат и ниобат лития, а также анизотропия акустических потерь и ангармонические процессы во многих кубических кристаллах, включая Ge, Si, InSb, MgO, KCl и др. Американские ученые исследовали механизмы затухания и акустические свойства диэлектрических и полупроводниковых кристаллов различной симметрии. В частности, впервые был рассмотрен тензор Грюнайзена для анизотропных материалов на примере кристаллов кварца. Следует отметить исследования французских ученых, которые изучали распространение акустических волн в различных анизотропных структурах и кристаллах, включая кристаллы танталата и ниобата лития. Ученые из Узбекистана внесли крупный вклад в развитие исследований в области физической акустики, акустоэлектроники и акустооптики. Ими исследованы акустические свойства ряда диэлектрических и жидких кристаллов и наножидкостей методами Брэгговской дифракции света и рассеяния Мандельштама – Бриллюэна.

Несмотря на то, что многие упругие свойства этих кристаллов были исследованы, детальные исследования анизотропии упругих свойств и, особенно, механизмов затухания акустических волн и констант ангармонизма, определяющих величину затухания и их анизотропию в исследованных кристаллах, практически отсутствуют, а имеющиеся данные по этим

свойствам являются противоречивыми. Между тем, знание механизмов затухания акустических волн и анизотропии акустических характеристик в кристаллах необходимо для расширения технологических возможностей их применения в акустоэлектронных и акустооптических устройствах для исследовательских и информационных систем.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских проектов Института ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз. по теме ОТ-Ф2-56 «Внутреннее движение и волновая форма теплопереноса в суперионных трифторидах редких земель LnF_3 » (2017-2020), а также утвержденной согласно указу Президента Республики Узбекистан № УП-6260 от 13.07.2021 года программы научно-исследовательских работ Института ионно-плазменных и лазерных технологий по теме: «Нелинейные явления, фазовые переходы и анизотропия упругих, фотоупругих и суперионных свойств в диэлектрических и сегнетоэлектрических кристаллах» (2021-2024).

Целью исследования является выявление механизмов затухания акустических волн и закономерностей анизотропии акустических характеристик в некоторых кристаллах кубической и тригональной симметрии.

Задачи исследования:

акустическими и акустооптическими методами определить значения скорости и затухания высокочастотных акустических волн вдоль осей симметрии в кристаллах ниобата и танталата лития и фторидов лития и натрия;

установить с помощью компонент тензора Грюнайзена в кубических кристаллах фторида лития и натрия пространственную дисперсию эффективных констант ангармонизма;

определить параметры анизотропии по мнимым упругим постоянным в кубических кристаллах фторидов лития и натрия

определить механизм влияния диэлектрических потерь на величину затухания пьезоактивных акустических волн в тригональных кристаллах ниобата и танталата лития;

выявить закономерности изменения скорости и затухания акустических волн в кристаллах ниобата и танталата лития в области сегнетоэлектрического фазового перехода.

Объектом исследования являются механизмы затухания акустических волн, эффективные константы ангармонизма и закономерности анизотропии акустических характеристик в кристаллах ниобата и танталата лития и фторидов лития и натрия.

Предметом исследования являются скорость распространения и коэффициент затухания высокочастотных акустических волн в кристаллах ниобата и танталата лития, фторидов лития и натрия.

Методы исследования: акустооптический и импульсно-интерференционный методы измерения скорости и коэффициента затухания акустических волн в материалах.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые введен фактор анизотропии мнимых упругих модулей для кубических кристаллов всех точечных групп симметрии и установлено, что он хорошо описывает анизотропию коэффициента затухания акустических волн в кристаллах фторидов лития и натрия;

предложен новый подход к определению тензора Грюнайзена и его компонент в кубических кристаллах, с помощью которых выявлена пространственная дисперсия эффективных констант ангармонизма, объясняющая сильную анизотропию затухания акустических волн в этих кристаллах;

показано, что в нецентросимметричных кристаллах ниобата и танталата лития для пьезоактивных акустических волн необходимо учитывать вклад диэлектрических потерь в затухание, величина которого может достигать 30%;

определены механизмы затухания продольных акустических волн в кристаллах танталата лития в области сегнетоэлектрического фазового перехода, обусловленные флуктуациями параметра порядка в области фазового перехода.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

определены направления с минимальным затуханием акустических волн в кристаллах ниобата и танталата лития и фторидов лития и натрия, при которых достигаются наименьшие акустические потери.

Достоверность результатов исследования обуславливается физической обоснованностью поставленных задач, использованием хорошо апробированных акустических и акустооптических методов измерения скорости и затухания акустических волн в кристаллах, большим объемом экспериментальных результатов и их согласованностью с фундаментальными законами и основными положениями физики конденсированного состояния, а также согласованностью полученных результатов с некоторыми результатами других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов заключается в том, что введение параметров анизотропии по действительным и мнимым упругим постоянным позволяет одновременно описывать анизотропию скорости и коэффициента затухания акустических волн в кубических кристаллах любой симметрии. Кроме того, знание коэффициента затухания акустических волн вдоль одного направления, позволяет определить эту величину вдоль других кристаллографических направлений. Впервые изученные механизмы затухания акустических волн в кристаллах танталата лития в области фазового перехода объясняют природу аномальной температурной зависимости затухания акустических волн при фазовом переходе в этих кристаллах.

С практической точки зрения полученные результаты могут быть полезны для предсказания общего характера анизотропии затухания акустических волн как в центросимметричных, так и в нецентросимметричных кубических кристаллах и определения в них наиболее выгодных срезов для применения в реальных устройствах.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по определению механизмов затухания акустических волн и закономерностей анизотропии акустических характеристик в кристаллах:

введенный коэффициент анизотропии мнимых упругих модулей для кубических кристаллов всех точечных групп симметрии использован в Институте материаловедения АН РУз в рамках узбекско-белорусского проекта № МРБ-АН-2019-17 «Исследование широкополосных композиционных просветляющих покрытий для солнечных элементов» (2019-2021) (Письмо АН РУз № 2/1255-1863 от 08.08.2022 г.). Использование научных результатов позволило подобрать просветляющие покрытия для повышения эффективности солнечных элементов;

новый подход к определению тензора Грюнайзена и его компонент в кубических кристаллах были применены в Институте ядерной физики АН РУз в рамках фундаментального проекта ОТ-Ф2-26 «Механизмы формирования функциональных наноструктур в пучке электронов» (2017–2019) при изучении среднеквадратичного смещения атомов, теплоемкости, эффективных упругих постоянных и коэффициента термического расширения в кристаллах фторида лития (Письмо АН РУз № 2/1255-1862 от 08.08.2022 г.). Использование научных результатов позволило объяснить механизм сильной анизотропии механических свойств кристаллов фторида лития;

определенные механизмы затухания продольных акустических волн в кристаллах танталата лития в области сегнетоэлектрического фазового перехода, выявленные закономерности в ориентациях кристаллических звукопроводов, при которых достигаются наименьшие акустические потери, были использованы в Институте материаловедения АН РУз в рамках узбекско-белорусского проекта № МРБ-АН-2019-17 «Исследование широкополосных композиционных антиотражающих покрытий для солнечных элементов» (2019-2021) (Письмо АН РУз № 2/1255-1863 от 08.08.2022 г.). Использование научных результатов позволило определить критерий выбора практических срезов этих кристаллов с целью увеличения коэффициента просветления.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на 8 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 12 научных работ, из них 3 статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из которых 1 в зарубежном научном журнале.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 103 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность диссертационной темы, определена связь проведенных исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан, описана степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи исследования. Рассмотрены также объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, показана их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Теория акустических волн в кристаллах»** приведена теория акустических волн в кристаллах с учетом влияния пьезоэлектрического эффекта на скорость и затухание волн. В отдельном разделе первой главы рассмотрены основные механизмы затухания, характерные для диэлектрических и сегнетоэлектрических кристаллов, к которым относятся исследованные кристаллы. Подробно рассмотрены фонон-фононный механизм Ахиезера и механизм влияния диэлектрических потерь на акустическое затухание. В третьем разделе приведены литературные и справочные данные по акустическим свойствам исследованных кристаллов. Из проведенного обзора делается вывод, что, несмотря на имеющиеся в литературе работы по упругим свойствам кристаллов фторидов лития и натрия, а также ниобата и танталата лития многие закономерности анизотропии затухания акустических волн в них остаются неизученными.

Во второй главе диссертации **«Методы и экспериментальные установки»** в первом разделе дана общая характеристика исследованных образцов и особенности температурных измерений затухания и скорости акустических волн. Образцы представляли собой кубические призмы, грани которых были ориентированы вдоль кристаллофизических направлений [100], [001] и [110] с точностью до 1 градуса. Размеры призм были от 1 до 2 см. Акустические волны в них возбуждались пьезоэлектрическими преобразователями из кварца соответственно X - и Y-срезов, с собственными частотами от 30 до 50 МГц.

Импульсно-интерференционные методы измерения характеристик акустических волн описаны во втором разделе. Рассмотрен модифицированный метод Вильямса–Лэмба, позволяющий одновременно определять скорость и затухание акустических волн. Особенностью метода является амплитудный селектор, который открывается в определенный промежуток времени. В измерительной системе формируются две серии

акустических импульсов. При наложении этих серий импульсов их суммарная амплитуда зависит от разности фаз между заполняющими эти импульсы колебаниями, которую можно изменять, регулируя частоту СВЧ генератора.

Наблюдая интерференционные нули или максимумы амплитуд сигнала, можно определить скорость акустической волны:

$$V = 2L \cdot \Delta\nu, \quad (1)$$

где L – длина образца, $\Delta\nu$ – разность двух частот генератора, соответствующих противофазной интерференции. При этом точность определения скорости за счет амплитудной и временной селекции сигнала составляет $\sim 0,01\%$.

Коэффициент затухания α , определялся из соотношения:

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} 20 \lg \frac{A_1}{A_2}, \quad \text{дБ/см}, \quad (2)$$

где A_1 и A_2 – амплитуда первого и второго импульса, соответственно, в наблюдаемой серии акустических эхоимпульсов.

Акустооптический метод определения акустических характеристик и акустооптическая измерительная система рассмотрены в третьем разделе главы. Измерительная установка состоит из акустической части для возбуждения акустических волн в диапазоне частот 0,4-1,6 ГГц и оптической части для генерации света (длина волны 632.8 нм), и измерения интенсивности дифрагированного света.

Скорость акустической волны определялась из соотношения, которое связывает угол Брэгговской дифракции света θ_B со скоростью акустической волны V и ее частотой ν :

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda_0 \cdot \nu}{2 \cdot V} \quad (3)$$

Коэффициент затухания α , называемый коэффициентом затухания по мощности определяется из соотношения:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta t} 10 \lg \frac{I(x_1)}{I(x_2)}, \quad \text{дБ/мкс} \quad (4)$$

где $I(x_1)$ и $I(x_2)$ – интенсивность дифрагированного света, соответственно, в точках x_1 и x_2 вдоль направления распространения акустической волны

В третьей главе диссертации **«Акустические свойства кубических кристаллов фторида лития и фторида натрия»** приведены результаты исследования акустических свойств и параметров анизотропии в кубических кристаллах фторида лития и фторида натрия.

В первом разделе *«Анизотропия скорости и эффективных упругих констант в кубических кристаллах фторидов лития и натрия»* представлены результаты измерений скорости акустических волн и эффективных упругих констант в кристаллах фторида лития (таблица 1) и фторида натрия (таблица 2) вдоль основных кристаллографических направлений [100], [110] и [111] при комнатной температуре. Значения коэффициента затухания акустических волн в этих таблицах приведены для частоты 1 ГГц. Независимые компоненты тензора упругости: c'_{11} , c'_{12} , c'_{44} , c''_{11} , c''_{12} и c''_{44} определялись из данных по

скорости и затуханию продольных и поперечных акустических волн вдоль направлений $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$.

Эффективные упругие постоянной $c'_{\text{эфф}}$ и $c''_{\text{эфф}}$ определялись с помощью выражения:

$$c_{\text{эфф}} = c'_{\text{эфф}} + ic''_{\text{эфф}} = c'_{ijkl} \kappa_j \kappa_l \eta_i \eta_k + ic''_{ijkl} \kappa_j \kappa_l \eta_i \eta_k, \quad (5)$$

где κ_j и η_i – направляющие косинусы волнового вектора и вектора смещений.

Таблица 1

Скорость и затухание акустических волн, эффективные действительные и мнимые упругие константы в кристаллах LiF

q	η	Выражение $c_{\text{эфф}}$	V , $10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$c'_{\text{эфф}}$, $10^{10} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$	α , $\text{дБ} \cdot \text{мкс}^{-1}$	$c''_{\text{эфф}}$, $10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$
[100]	[100]	c_{11}	6.51	11.2	6.16	2.53
	[001]	c_{44}	4.89	6.32	1.21	0.28
		c_{12}		4.56		-0.42
[110]	[110]	$(c_{11} + c_{12} + 2c_{44})/2$	7.33	14.2	2.59	1.35
	[110]	$(c_{11} - c_{12})/2$	3.55	3.32	12.0	1.46
	[001]	c_{44}	4.89	6.32	1.21	0.28
[111]	[111]	$(c_{11} + 2c_{12} + 4c_{44})/3$	7.59	15.2	1.72	0.96
	[110]	$(c_{11} - c_{12} + c_{44})/3$	4.05	4.32	6.75	1.07

Таблица 2

Скорость и затухание акустических волн, эффективные действительные и мнимые упругие константы в кристаллах NaF

q	η	Выражение $c_{\text{эфф}}$	V , $10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$c'_{\text{эфф}}$, $10^{10} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$	α , $\text{дБ} \cdot \text{мкс}^{-1}$	$c''_{\text{эфф}}$, $10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$
[100]	[100]	c_{11}	5.86	9,63	14.0	4,95
	[001]	c_{44}	3.14	2.76	1.80	0.18
		c_{12}		2.42		-0.35
[110]	[110]	$(c_{11} + c_{12} + 2c_{44})/2$	5,60	8.79	7.70	2.48
	[110]	$(c_{11} - c_{12})/2$	3.59	3.61	20.0	2.65
	[001]	c_{44}	3.14	2.76	1.80	0.18
[111]	[111]	$(c_{11} + 2c_{12} + 4c_{44})/3$	5.51	8.50	5.32	1.66
	[110]	$(c_{11} - c_{12} + c_{44})/3$	3.44	3.32	15,0	1.83

Анизотропия упругих свойств кристаллов исследовалась с помощью системы уравнений Грина - Кристоффеля в виде:

$$(\Gamma_{ik} - \rho V^2 \delta_{ik}) \gamma_k = 0 \quad (6)$$

где V – скорость акустической волны, δ_{ik} – единичный тензор Кронекера, γ_k – компоненты вектора поляризации, ρ – плотность кристалла. Компоненты тензора Грина-Кристоффеля Γ_{ik} определяются выражением:

$$\Gamma_{ik} = c_{ijkl} \kappa_j \kappa_l, \quad (7)$$

Для нахождения действительных компонент тензора Грина-Кристоффеля Γ'_{ik} в выражения (7) надо подставлять действительные компоненты упругих констант c'_{ijkl} и, соответственно, для нахождения мнимых компонент Γ''_{ik} необходимо использовать мнимые компоненты констант c''_{ijkl} .

Эффективные действительные упругие постоянные $c'_{эфф}$ определялись из значений скорости V акустических волн:

$$c''_{эфф} = \frac{\alpha \cdot c'_{эфф}}{\pi V}, \quad c'_{эфф} = \rho V^2, \quad (8)$$

В общем случае направления векторов волновой нормали κ и поляризации η не совпадают. В частности, для квазипродольных волн в плоскости (110) при изменении направления волнового вектора относительно оси [110] на угол φ , тангенс угла отклонения вектора поляризации ψ от этой же оси, определяется из соотношения:

$$\psi = \arctg \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left(\frac{\Gamma'_{12} \Gamma'_{13} - \Gamma'_{23} (\Gamma'_{11} - \rho V^2)}{\Gamma'_{23} \Gamma'_{13} - \Gamma'_{12} (\Gamma'_{33} - \rho V^2)} \right) \quad (9)$$

Здесь Γ'_{ik} – действительные компоненты тензора Грина-Кристоффеля (7).

Результаты расчета углов поляризации ψ для квазипродольных волн в плоскости (110) приведены на рисунке 1 в виде зависимости отклонения поляризации от направления волнового вектора в этой плоскости. Видно, что в этой плоскости имеются три направления [110], [001] и [111], вдоль которых распространяются чистые продольные волны, а максимальное отклонение вектора поляризации от волнового вектора составляет 4.5 угловых градуса.

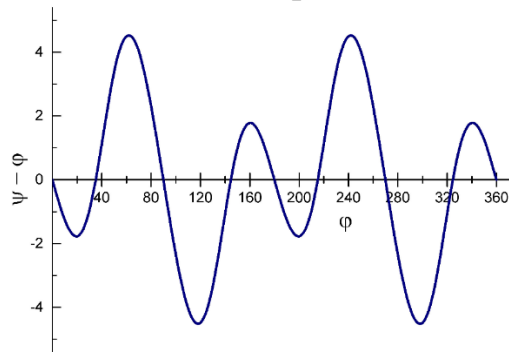


Рис. 1. Отклонение направления поляризации от направления волнового вектора в квазипродольной волне в кристаллах NaF в плоскости (110)

Ориентационная зависимость скорости акустических волн в плоскостях симметрии представляется в виде характеристических поверхностей. В качестве примера на рисунке 2 показано сечение поверхностей скорости в кристаллах фторидов лития и натрия плоскостью (110). В этой плоскости наиболее сильная анизотропия скорости наблюдается для чистых поперечных волн в кристаллах фторида лития. При этом отношение $V_{\max}/V_{\min}=1.43$.

В кристаллах фторида натрия анизотропия скорости намного слабее. Сильное различие между двумя кристаллами заключается и в параметре анизотропии по действительным упругим константам, который для них отличается по знаку.

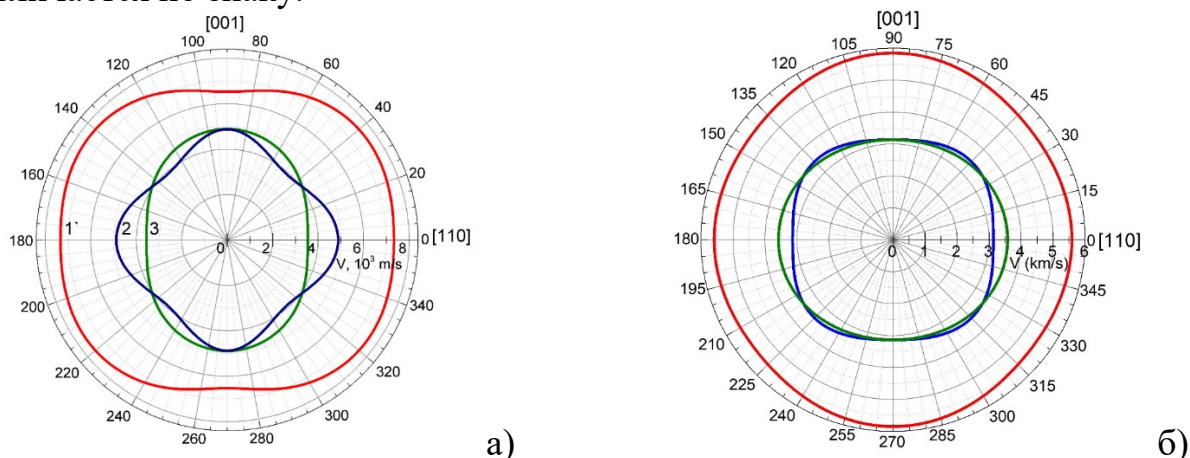


Рис 2. Сечение поверхностей фазовой скорости в кристаллах фторида лития (а) и фторида натрия (б) плоскостью (110): 1 - квазипродольные, 2 - квазипоперечные, 3 - чистые поперечные акустические волны

Во втором разделе третьей главы «Анизотропия акустического затухания и параметры анизотропии в кристаллах фторида лития и натрия» рассмотрено исследование анизотропии затухания акустических волн в этих кристаллах. Результаты определения затухания акустических волн и действительных и мнимых упругих констант, полученные для кристаллографических осей [100], [110] и [111] приведены в таблице 3.

Таблица 3

Эффективные действительные и мнимые упругие константы, и затухание акустических волн в кристаллах LiF и NaF

q	η	α , дБ·мкс ⁻¹		$C'_{эфф}$, 10 ¹⁰ Н·м ⁻²		$C''_{эфф}$, 10 ⁷ Н·м ⁻²		$\gamma_{эфф}$	
		LiF	NaF	LiF	NaF	LiF	NaF	LiF	NaF
[100]	[100]	6.16	14	11.2	9,71	2.53	4.95	2.53	3.42
	[001]	1.21	1.8	6.32	2.80	0.25	0.18	1.03	0.80
[110]	[110]	2.59	10	14.2	8.87	1.35	2.48	1.85	2.55
	[110]	12.0	20	3.32	3.64	1.46	2.65	2.35	3.22
	[001]	1.21	1.8	6.32	2.80	0.28	0.18	1.03	0.84
[111]	[111]	1.72	6.5	15.2	8,59	0.96	1.66	1.56	2.14
	[110]	6.75		4.32	3.36	1.07	1.83	2.02	2.75

Показано, что затухание акустических волн в области $\omega\tau \ll 1$ (ω - частота акустических волн, τ - время релаксации тепловых фононов) происходит по механизму Ахиезера и рассчитывается с помощью выражения:

$$\alpha = \frac{1}{2} \omega \frac{c''_{eff}}{c'_{eff}}, \quad (10)$$

На основе данных таблицы 3 и формулы (10) построены сечения поверхностей акустического затухания плоскостями в кристаллах фторида лития и натрия.

Сечение плоскостью (110) показано на рисунке 3.

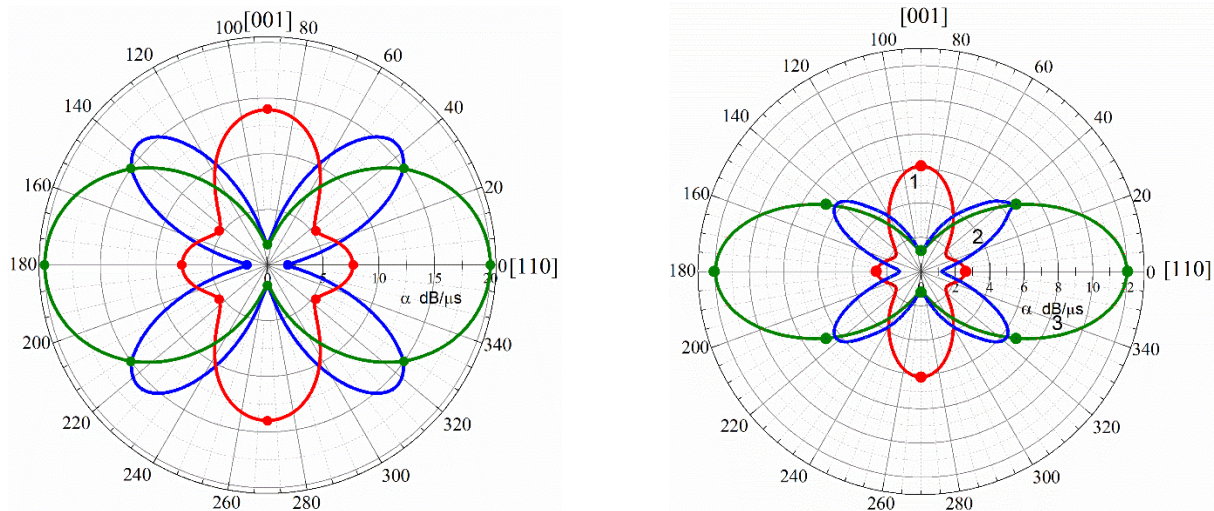


Рис 3. Сечение поверхностей затухания плоскостью (110). для квазипродольных (1), квазипоперечных (2) и чистых поперечных (3) волн в кристаллах NaF и LiF.д Точки - результаты эксперимента

Анизотропию скорости акустических волн и анизотропию упругих свойств хорошо характеризует параметр анизотропии по действительным упругим постоянным $\Delta c'$:

$$\Delta c' = 2c'_{44} - (c'_{11} - c'_{12}), \quad (11)$$

По аналогии с этим параметром для характеристики анизотропии затухания мы ввели параметр анизотропии по мнимым упругим постоянным $\Delta c''$:

$$\Delta c'' = 2c''_{44} - (c''_{11} - c''_{12}) \quad (12)$$

Для характеристики анизотропии акустических свойств кристаллов используется действительный фактор акустической анизотропии A' , который для кубических кристаллов равен:

$$A' = \frac{c'_{11} - c'_{12}}{2c'_{44}} = \left(\frac{V_{110}^S}{V_{001}^S} \right)^2 \quad (13)$$

Также, вместо параметра анизотропии по мнимым упругим константам можно использовать мнимый фактор акустической анизотропии A'' , впервые введенный нами:

$$A'' = \frac{c''_{11} - c''_{12}}{2c''_{44}} = \frac{\alpha_{110}^S}{\alpha_{001}^S} \left(\frac{V_{110}^S}{V_{001}^S} \right)^2 = \frac{\alpha_{110}^S}{\alpha_{001}^S} A' \quad (14)$$

Все эти параметры анизотропии позволяют анализировать характер анизотропии скорости и затухания акустических волн в кубических кристаллах. Так, зная параметры анизотропии по мнимым упругим постоянным $\Delta c''$ или A'' можно предсказать направления, вдоль которых будет наименьшее затухание акустических волн. Как видно из соотношений (13) и (14) для определения этих параметров достаточно измерить затухание и скорость двух поперечных волн с разной поляризацией вдоль $[110]$, и рассчитать их из этих соотношений.

В таблице 4 приведены действительные и мнимые частые параметров анизотропии и факторов акустической анизотропии в кристаллах LiF, NaF. Видно, что они имеют кристаллы как с положительным, так и отрицательным параметром анизотропии.

Таблица 4

Параметры упругой анизотропии по действительным и мнимым упругим постоянным в кристаллах кубической симметрии

Кристалл	$\Delta c'$	$\Delta c''$	A'	A''
LiF	+5.83	-2.45	0.54	5.36
NaF	-1.69	-4.94	1.31	14.5

Анализ экспериментальных данных по затуханию акустических волн в кубических кристаллах показывает, что знание параметров анизотропии позволяет ввести критерий, согласно которому для затухания акустических волн в кубических кристаллах при мнимом отрицательном параметре акустической анизотропии должны выполняться неравенства:

$$\alpha_{[100]}^L > \alpha_{[110]}^L > \alpha_{[111]}^L \quad (15)$$

$$\alpha_{[110]}^{QS} > \alpha_{[111]}^S > \alpha_{[100]}^S = \alpha_{[110]}^S \quad (16)$$

где нижние индексы указывают направление распространения волны. Эти соотношения справедливы для кристаллов LiF и NaF, у которых этот параметр отрицателен, а фактор акустической анизотропии намного больше единицы.

Таким образом, на основании анализа параметров анизотропии по мнимым упругим постоянным из соотношений (15) или (16) можно предсказать направления, вдоль которых будет наблюдаться наименьшее затухание продольных и поперечных акустических волн.

В третьем разделе третьей главы «Анизотропия акустического затухания и тензор Грюнайзена в кристаллах фторида лития и натрия» приведены результаты исследования анизотропии акустического затухания и тензора Грюнайзена в кристаллах фторида лития и натрия. Согласно теории Ахиезера выражение для затухания может быть записано в следующем виде:

$$\alpha = \gamma^2 \frac{\beta \cdot 8.68 \cdot \lambda T \omega^2}{2 \rho V^2 V_D^2} \quad (17)$$

где β – множитель, T – температура, λ – коэффициент теплопроводности, γ – эффективная константа Грюнайзена, V_D – Дебаевская скорость. С помощью экспериментальных значений затухания в кристаллах и выражения (17) были определены эффективные константы Грюнайзена для направлений [100], [110] и [111], которые приведены в таблице 3. Используя выражения (10) и (17) можно выразить эффективную константу Грюнайзена через соотношение:

$$\gamma_{эфф} = \left(\frac{c''_{эфф} \cdot V_D^2}{2 \cdot \lambda \cdot T \cdot \omega} \right)^{1/2} \quad (18)$$

Соотношение (18) впервые введено нами и позволяет определить эффективные константы Грюнайзена для продольных и поперечных волн, через независимые компоненты этого тензора γ_{ik} из соотношения:

$$\gamma_{эфф} = \gamma_{ik} \eta_i \kappa_k, \quad (19)$$

Такой подход возможен, поскольку в кубических кристаллах для всех направлений, совпадающих с осями симметрии четвертого порядка, в частности для [100], значение эффективной константы Грюнайзена будет совпадать для продольных волн с компонентой тензора γ_{11} , а для поперечных волн – с компонентой γ_{12} . В результате установлено, что в кристаллах фторида натрия компоненты акустического тензора Грюнайзена γ_{11} и γ_{12} равны, соответственно 3.42 и -0.81. В кристаллах фторида лития эти компоненты γ_{11} и γ_{12} равны, соответственно 2.53 и -0.95

Используя полученные нами значения компонент акустического тензора Грюнайзена γ_{11} и γ_{12} и выражение (20) можно определить ориентационную зависимость эффективной константы Грюнайзена для квазипродольных волн или квазипоперечных волн в какой-нибудь кристаллографической плоскости исследованных кристаллов. Такая зависимость для кристаллах фторида натрия при распространении квазипродольных акустических волн в плоскости (001) представлена на рисунке 4. Сплошной линией показан результат расчета по формуле (19), точками – результат расчета через компоненты тензора Грюнайзена с помощью выражения (20).

Видно, что эффективные константы, определенные двумя способами, хорошо совпадают между собой. Такая же ориентационная зависимость эффективной константы Грюнайзена для всех акустических волн, распространяющихся в кристаллографической плоскости (110) в кристаллах фторида натрия приведена на рисунке 5.

В четвертой главе: **«Акустические свойства тригональных кристаллов танталата и ниобата лития»** рассмотрены результаты исследования механизмов затухания и анизотропии характеристик акустических волн в кристаллах ниобата и танталата лития, включая область сегнетоэлектрического фазового перехода.

Первый раздел четвертой главы «Затухание акустических волн за счет пьезоэлектрической связи деформации с диэлектрической поляризацией» посвящен исследованию затухания пьезоактивных волн в кристаллах ниобата и танталата лития. Для этих волн необходимо учитывать вклад диэлектрических потерь в затухание, особенно для кристаллов LiNbO_3 , у которых коэффициент электромеханической связи достаточно большой.

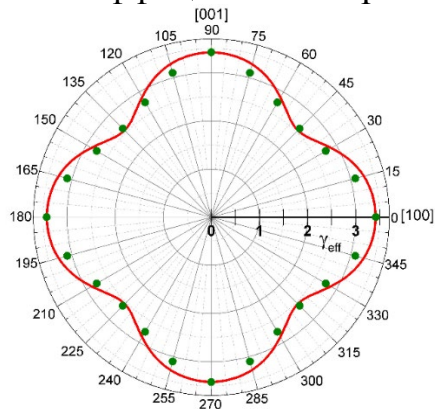


Рис. 4. Ориентационная зависимость эффективной константы Грюнайзена для квазипродольных волн в плоскости (001) в кристаллах фторида натрия

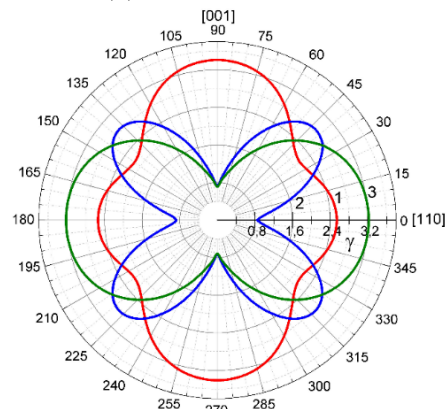


Рис 5. Сечение поверхностей эффективной константы Грюнайзена в кристаллах фторида натрия плоскостью (110) для квазипродольных (1), квазипоперечных (2) и чистых поперечных акустических волн (3)

Такие расчеты были произведены для продольных и поперечных акустических волн, распространяющихся в плоскости (100) и представлены на рисунке 6. в виде ориентационной зависимости затухания акустических волн.

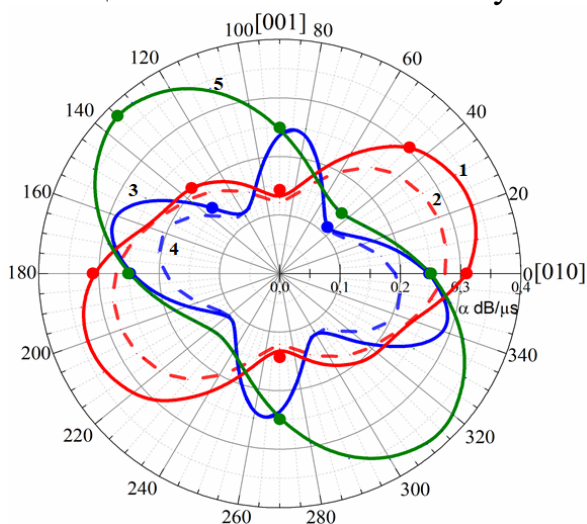


Рис. 6. Сечение поверхностей акустического затухания продольных (1, 2) и поперечных (3, 4, 5) волн кристаллах LiNbO_3 плоскостью (100): 1 и 3 с учетом влияния диэлектрических потерь, 2 и 4 без их учета. Точки - результаты эксперимента

При расчетах учитывался вклад диэлектрических потерь в мнимые компоненты тензора упругих констант, а значит и в величину затухания. Из рисунка видно, что в кристаллах LiNbO_3 кроме сильной анизотропии затухания ($\alpha_{\text{макс}}/\alpha_{\text{мин}} > 2.5$) имеет место заметный вклад диэлектрических потерь в величину и анизотропию затухания. В частности, для квазипродольных акустических волн максимальный вклад в затухание этих волн может составлять до 25% от общего затухания.

Второй раздел четвертой главы «Механизмы затухания акустических волн в области фазового перехода в кристаллах танталата лития» посвящен результатам исследования механизмов затухания продольных и поперечных упругих волн в кристаллах танталата лития вблизи сегнетоэлектрического фазового перехода. Результаты измерения скорости и затухания акустических волн на частоте 150 МГц в кристаллах LiTaO_3 вдоль осей X и Z показаны на рис. 7, где сплошными линиями показаны результаты расчета по формулам теории. Видно, что затухание исследованных типов волн с приближением к температуре перехода быстро возрастает в интервале температур $(T_c - T) \sim 80\text{--}150\text{ K}$. При этом затухание продольных акустических волн вдоль оси X в сегнето-и параэлектрической фазах, в отличие от затухания продольных волн вдоль оси Z, несимметрично относительно температуры Кюри (рис. 7 а). Различие наблюдается и для скорости этих волн. Если скорость акустических волн вдоль оси Z не имеет аномалий в области температуры Кюри, то скорость продольных и поперечных волн вдоль оси X испытывает скачок при переходе из сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую фазу (рис. 7 б).

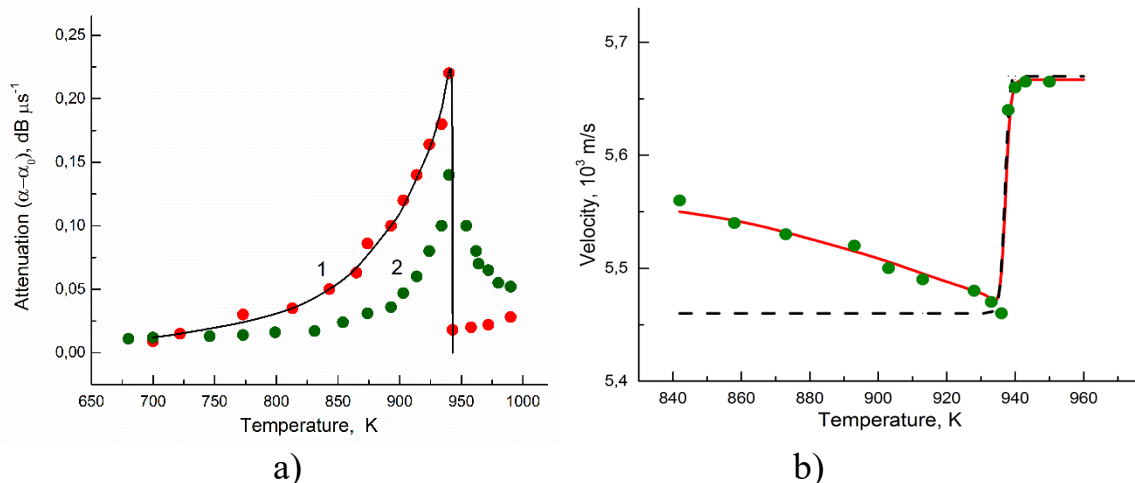


Рис. 7. Температурная зависимость скорости (b) и затухания продольных акустических волн вдоль оси X (a2) и вдоль оси Z (a1) на частоте 150 МГц

Кристаллы танталата лития не обладают пьезоэффектом в параэлектрической фазе и в этой фазе связь акустических волн с поляризацией определяется электрострикционным взаимодействием, которое наблюдается для продольных акустических волн вдоль осей X, Y, и Z и аномальный рост затухания продольных акустических волн вблизи точки перехода может быть описан релаксационной теорией Ландау-Халатникова. Согласно этому

механизму рост затухания акустических волн вблизи температуры перехода T_c обусловлен резким возрастанием времени релаксации термодинамических флуктуаций спонтанной поляризации, индуцированных акустической волной за счет электрострикционного взаимодействия.

Электрострикционное взаимодействие акустических и поляризационных волн можно разделить на две части – релаксационное и флуктуационное. Релаксационный вклад, за счет взаимодействия акустических волн со спонтанной поляризацией ($g_{relax} \sim P_0 \delta P$) резко возрастает при приближении к точке фазового перехода ($T \rightarrow T_c$ ($T < T_c$)) и падает до нуля выше T_c , где $P_0 = 0$.

Он также сильно зависит от направления распространения акустической волны. В то же время, флуктуационный вклад, обусловленный взаимодействием упругих волн с тепловыми флуктуациями поляризации $g_{fluct} = \delta P^2$ должен иметь симметричный максимум в точке T_c .

Используя уравнение из теории для термодинамического потенциала кристаллов вблизи температуры фазового перехода и полагая, что значения, величин ΔP_z и ΔU_{ii} , индуцированных акустической волной за счет электромеханической связи, выражаются соотношениями.

$$\Delta P_z \text{ и } \Delta U_{ii} \sim \exp [i (\omega \cdot t - \mathbf{q} \cdot \mathbf{r})]$$

Можно получить уравнение для изменения параметра порядка в виде

$$\Delta P_z = - \frac{2LP_{z0} \tau (g_{31} u_{xx} + g_{33} u_{zz})}{1 + \omega^2 \tau^2} (1 - i\omega\tau) \quad (20)$$

Где τ имеет смысл времени релаксации и выражается следующим образом

$$\tau = \frac{1}{2aL} (T_c - T)^{-1} \quad (21)$$

С помощью стандартной методики расчета затухания акустических волн по механизму Ландау-Халатникова, получены выражения для коэффициента затухания продольных акустических волн, распространяющихся вдоль осей X и Z, соответственно.

$$\alpha_{Lx} = \frac{g_{31}^2 \omega^2}{c_{11} a \beta L} (T_c - T)^{-1} \quad (22)$$

Выражение (22) справедливо при выполнении условия $\omega\tau \ll 1$, и показывает, что в кристаллах LiTaO_3 для продольных волн вдоль оси X должен наблюдаться рост затухания по мере приближения к точке перехода.

Согласно эксперименту, затухание продольных волн вдоль оси X вблизи фазового перехода изменяется с частотой по квадратичному закону, в то время как затухание продольных волн вдоль оси Z зависит от частоты линейно.

На рисунке 8 приведены зависимости затухания продольных акустических волн вдоль осей Z и X от $(T_c - T)$ в логарифмическом масштабе. Видно, что они могут быть аппроксимированы в виде закономерностей: $\alpha = b_1 \cdot (T_c - T)^{-1}$ для продольных волн вдоль оси X, и в виде $\alpha = b_2 \cdot (T_c - T)^{-1/2}$ для продольных волн вдоль оси Z, которые показаны на рисунке 8 прямыми линиями.

Следовательно, температурная зависимость затухания продольных волн вдоль оси X также хорошо согласуется с механизмом Ландау-Халатникова. На

основе этих результатов, мы оценили время релаксации поляризации для кристаллов LiTaO_3 , которое оказалось равным $2.3 \cdot 10^{-12}$ с., примерно на порядок меньше, чем у кристаллов триглицинсульфата. Этим объясняется относительно малое увеличение затухания продольных волн вдоль оси X, в области фазового перехода (рис. 7а).

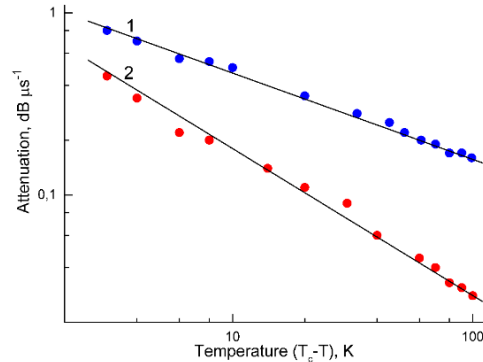


Рис. 8. Зависимость затухания продольных акустических волн вдоль осей X и Z от степени приближения к фазовому переходу ($T_c - T$)

Для объяснения наблюдаемой зависимости скорости этих волн при фазовом переходе (рис. 7b), необходимо учитывать третий член в разложении термодинамического потенциала в теории Ландау-Халатникова:

$$\Phi = \frac{1}{2\chi} P_Z^2 + \frac{1}{4} \beta P_Z^4 + \frac{1}{6} \gamma P_Z^6 + g_{31} U_{xx} P_Z^2 + g_{33} U_{zz} P_Z^2 \quad (23)$$

Тогда выражение для изменения скорости при фазовом переходе имеет вид:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{g_{31}^2}{c_{11} [\beta^2 + 4a\gamma(T_c - T)]^{1/2}} \quad (24)$$

Подставляя значения коэффициентов a , β и γ , известные из литературы, в (24), получаем температурную зависимость в виде

$$\frac{\Delta V}{V} = 7 \cdot 10^{-3} \frac{1}{[1 + 0.0088(T_c - T)]^{1/2}} \quad (25)$$

Формула (25) хорошо описывает плавное изменение скорости продольных волн вдоль оси X при фазовом переходе (кривая на рис. 7b).

В то же время аномалии затухания продольных акустических волн вдоль оси Z, не обусловлены их взаимодействием с параметром порядка. Для этих волн основной вклад в затухание может давать их взаимодействие со связанными зарядами, за счет электрострикционного механизма. В результате максимум затухания может быть обусловлен пиком диэлектрических потерь:

$$\Delta\alpha = \frac{\omega}{2\rho V^2} \frac{e_{\text{eff}}^2}{\varepsilon'} \frac{\text{tg} \delta}{1 + \text{tg} \delta^2} \quad (26)$$

В этом случае частотная зависимость затухания волн вблизи перехода должна быть линейной, что действительно наблюдается на эксперименте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «Механизмы затухания акустических волн и анизотропия акустических характеристик в кристаллах кубической и тригональной симметрии» можно сделать следующие выводы.

1. Впервые определены все независимые действительные и мнимые компоненты комплексного тензора упругости и построены характеристические поверхности затухания в кубических кристаллах фторида лития и фторида натрия.
2. Предложен новый подход к определению компонент тензора Грюнайзена и эффективных констант ангармонизма и установлена связь между эффективной константой Грюнайзена и анизотропией акустического затухания.
3. Для кубических кристаллов фторида натрия и фторида лития впервые определены компоненты тензора Грюнайзена, с помощью которых показано, что пространственная дисперсия эффективных констант ангармонизма объясняет сильную анизотропию акустического затухания в этих кристаллах.
4. Показано, что в нецентросимметричных кристаллах ниобата и танталата лития для пьезоактивных акустических волн необходимо учитывать вклад диэлектрических потерь в затухание, величина которого может достигать 25%;
5. Установлено, что в кристаллах танталата лития аномальные изменения затухания продольных акустических волн вдоль оси X вблизи фазового перехода зависят от частоты по квадратичному закону и хорошо объясняются механизмом Ландау-Халатникова.
6. Показано, что, несмотря на линейную связь продольных волн вдоль оси Z с параметром порядка, аномальное затухание этих волн при фазовом переходе не подчиняется релаксационному механизму Ландау-Халатникова и может быть обусловлено максимумом диэлектрических потерь в точке фазового перехода в этом случае частотная зависимость затухания продольных волн вблизи перехода должна быть линейной, что действительно наблюдается на эксперименте

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

KURBANOV JAKHONGIR

**ATTENUATION MECHANISMS OF ACOUSTIC WAVES AND
ANISOTROPY OF ACOUSTIC CHARACTERISTICS IN CRYSTALS OF
CUBIC AND TRIGONAL SYMMETRY**

01.04.07 – Condensed matter physics

DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences

Tashkent – 2022

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number № B2022.1.PhD/FM683

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website of “Ziyonet” information and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor: **Akhmedzhanov Farxad Rashidovich**
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent

Official opponents: **Bakhramov Sagdulla Abdullayevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor, Academic

Azamatov Zakir Toxirovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Tashkent State Technical University named
after Islam Karimov**

The defense of the dissertation will be held on “____” _____ 2022 at _____ at the meeting of Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city, tel. (+99871)289-31-41; fax: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the Information Resource Center of Institute of Nuclear Physics (registered under No. _____) Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871)289-31-19).

The abstract of dissertation was distributed on “____” _____ 2022
(Registry record No. ____ dated “____” _____ 2022)

M.Yu. Tashmetov
Chairman of Scientific Council
on award of scientific degree
D.Ph.-M.S., Professor

O.R. Tojiboev
Scientific Secretary of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees, PhD.Ph-M.S,
Senior Researcher

E.M. Tursunov
Chairman of the scientific seminar of the
scientific council on award of scientific
degrees, D.Ph.-M.S., professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research is to reveal the mechanisms of attenuation of acoustic waves and the regularities of the anisotropy of acoustic characteristics in some crystals of cubic and trigonal symmetry.

The tasks of the research: using acoustic and acousto-optical methods:

to determine the velocity and attenuation of high-frequency acoustic waves along the symmetry axes in crystals of lithium niobate and tantalate and lithium and sodium fluorides;

to establish the mechanisms of attenuation of high-frequency acoustic waves in crystals of lithium niobate and tantalate and lithium and sodium fluorides;

to determine the mechanism of influence of dielectric losses on the damping value of piezoactive acoustic waves in trigonal crystals;

to reveal patterns of changes in the speed and attenuation of acoustic waves during their propagation in symmetry planes in crystals of lithium niobate and tantalate and lithium and sodium fluorides;

to introduce and determine the anisotropy parameters in terms of imaginary elastic constants in cubic crystals of lithium and sodium fluorides

The object of the research is the damping mechanisms of acoustic waves, the effective anharmonicity constants, and the regularity of anisotropy of acoustic characteristics in crystals of lithium niobate and tantalate and lithium and sodium fluorides.

The subject of research is the propagation velocity and attenuation coefficient of high-frequency acoustic waves in crystals of lithium niobate and tantalate, lithium and sodium fluorides.

The scientific novelty of the research is as follows:

the anisotropy factor of imaginary elastic moduli for cubic crystals of all point symmetry groups was introduced for the first time and it was found that it well describes the anisotropy of the damping coefficient of acoustic waves in lithium and sodium fluoride crystals;

a new approach to the determination of the Grüneisen tensor and its components in cubic crystals is proposed, with the help of which the spatial dispersion of the effective anharmonicity constants is revealed, which explains the strong anisotropy of the damping of acoustic waves in these crystals;

it is shown that in non-centrosymmetric crystals of lithium niobate and tantalate for piezoactive acoustic waves it is necessary to take into account the contribution of dielectric losses to damping, the value of which can reach 30%;

the mechanisms of attenuation of longitudinal acoustic waves in lithium tantalate crystals in the region of the ferroelectric phase transition, which are due to fluctuations of the order parameter in the region of the phase transition, are determined.

Implementation of the research results. Based on the results obtained on the determination of the mechanisms of attenuation of acoustic waves and the regularities of the anisotropy of acoustic characteristics in crystals:

the introduced anisotropy factor of imaginary elastic moduli for cubic crystals of all point symmetry groups was used at the Institute of Materials Science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan in the framework of the Uzbek-Belarusian project No. MRB-AN-2019-17 "Research of broadband composite anti-reflective coatings for solar cells" (2019-2021) (Letter AN RUz No. 2/1255-1863 dated 08.08.2022). The use of scientific results made it possible to choose anti-reflective coatings in order to increase efficiency solar cells;

a new approach to determining the Grüneisen tensor and its components in cubic crystals was applied at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan as part of the fundamental project OT-F2-26 "Mechanisms for the formation of functional nanostructures in an electron beam" (2017–2019) in the study of the root-mean-square displacement of atoms, heat capacity, effective elastic constants and thermal expansion coefficient in lithium fluoride crystals (Letter of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 2/1255-1862 dated 08.08.2022). The use of scientific results made it possible to explain the mechanism of strong anisotropy of the mechanical properties of lithium fluoride crystals;

certain mechanisms of attenuation of longitudinal acoustic waves in lithium tantalate crystals in the region of the ferroelectric phase transition, the revealed patterns in the orientations of crystalline acoustic conductors, at which the lowest acoustic losses are achieved, were used at the Institute of Materials Science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan within the framework of the Uzbek-Belarusian project No. MRB-AN-2019- 17 "Research of broadband composite anti-reflection coatings for solar cells" (2019-2021) (Letter of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 2/1255-1863 dated 08.08.2022). The use of scientific results made it possible to determine the criterion for selecting practical sections of these crystals in order to increase the coefficient of enlightenment.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation work consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of used literature. The volume of the thesis is 104 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; Part I)

1. Ахмеджанов Ф.Р., Курбанов Ж.О., Махаров Н.М. Затухание акустических волн в кубических кристаллах фторида лития // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент: АН РУз, 2021. – № 5. – С. 11-15 (01.00.00. № 7).
2. Akhmedzhanov F.R., Kurbanov J.O. Attenuation of acoustic waves and Grüneisen tensor in lithium fluoride crystals // The Journal of the Acoustical Society of America. – Acoustical Society of America (USA), 2022. Vol. 151. – P. A273-A273 (№ 3. Scopus; IF=2,365).
3. Ахмеджанов Ф.Р., Курбанов Ж.О. Затухание акустических волн и тензор Грюнайзена в кубических кристаллах фторида натрия // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент: АН РУз, 2022. – № 2. – С. 12-16 (01.00.00. № 7).

II бўлим (II часть; part II)

4. Akhmedzhanov F.R., Kurbanov J.O., Boltabaev A.F. Attenuation of Acoustic Waves in Single-domain and Polydomain LiTaO₃ Crystals // – Barcelona (Spain), 2020. November. Vol. 246. Issue 7. – P. 42-47.
5. Akhmedzhanov F.R., Kurbanov J.O., Abdirakhmonov U.Sh. Extinction and velocity anisotropy in cubic crystals // International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS), 2020. September. Vol. 4. Issue 9. – P. 146-149.
6. Курбанов Ж.О., Ахмеджанов Ф.Р., Мустафаев Т.Ш. Затухание акустических волн в кристаллах иттрий-алюминиевого граната / “Наука и инновации” сборник статей Международной научной конференции. – Ташкент: Центр передовых технологий при Министерстве инновационного развития Республики Узбекистан, 2020. 27 ноября. – С. 220-222.
7. Akhmedzhanov F.R., Kurbanov J.O., Nazarov J.T Acoustic Studies of Phase Transition in Lithium Tantalate Crystals / Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics. – Keystone CO (USA), 2020. 19-23 July. – P. 1-4 // <https://doi.org/10.1109/IFCS-ISAF41089.2020.9234919>
8. Akhmedzhanov F.R., Mirzaev S.Z., Nazarov J.T., Kurbanov J.O. Attenuation of acoustic waves in LiTaO₃ Crystals / 6th International Conference on Sensors and Electronic Instrumentation Advances. – Porto (Portugal), 2020. 23-25 September. – P. 211-212.
9. Курбанов Ж.О., Ахмеджанов Ф.Р., Гафурова М.В. Вклад диэлектрических потерь в затухание акустических волн в кристаллах силиката висмута / Труды Республиканской научно-теоретической конференции “XXI

век – век интеллектуальной молодёжи”. – Ташкент: УЗР ФА, 2020. – С. 158-159.

10. Курбонов Ж.О., Мустафаев Т.Ш., Абдирахмонов У.Ш. Кубик кристалларда акустик тўлқинларнинг тезлиги анизотропияси / Материалы I Республиканской научной конференции. – Ташкент, 2021. 14-15 апреля. – С. 261-263.

11. Ахмеджанов Ф.Р., Курбанов Ж.О. Анизотропия акустического затухания в кубических кристаллах фторида лития / Восьмая Международная конференция по физической электронике ИРЕС-8: Сборник тезисов докладов. – Ташкент: Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, 2021. 23-24 сентября. – С. 153-154.

12. Akhmedzhanov F.R., Kurbanov J.O., Nazarov J.T. Anisotropy of Attenuation of Acoustic Waves in Pure and Doped LiNbO₃ Crystals / Proceedings ISAF-PFM-ECAPD Joint Conference. – Tours (France), 2022. June 27 – July 1. – P. 63 (1-3).