

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI

SAIDVALIYEV ULUGBEK ALIMJANOVICH

**GERMANAT VA SILIKAT VISMUT HAMDA PARATELLURIT
KRISTALLARIDA ELASTIK XOSSALARNING ANIZOTROPIYA
QONUNIYATLARI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2023

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

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

**Contents of the dissertation abstract of the Doctor of Philosophy (PhD) in
physical and mathematical sciences**

Saidvaliyev Ulugbek Alimjanovich

Germanat va silikat vismut hamda paratellurit

kristallarida elastik xossalarning anizotropiya qonuniyatlari..... 3

Саидвалиев Улугбек Алимжанович

Закономерности анизотропии упругих свойств

в кристаллах германата и силиката висмута и парателлурита.....23

Saidvaliev Ulugbek

Regularities of anisotropy of elastic properties of bismuth silicate, bismuth

germanate and paratellurite crystals.....43

E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati

Список опубликованных работ

List of published works.....48

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI

SAIDVALIYEV ULUGBEK ALIMJANOVICH

**GERMANAT VA SILIKAT VISMUT HAMDA PARATELLURIT
KRISTALLARIDA ELASTIK XOSSALARNING ANIZOTROPIYA
QONUNIYATLARI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2023

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № B2016.1.PhD/FM250 raqami bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasi (www.inp.uz) va "Ziyonet" axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan

Ilmiy maslahatchi: **Axmedjanov Farxad Rashidovich**
fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

Rasmiy opponentlar: **Baxramov Sagdulla Abdullaevich**
fizika-matematika fanlari doktori, professor, akademik

Muxtorov Adil Pozilovich
fizika-matematika fanlari nomzodi, katta ilmiy xodim

Yetakchi tashkilot: **Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Yadro fizikasi instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 raqamli Ilmiy kengashning 2023-yil _____ soat _____ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100174, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel. (+99871) 289-31-41; faks (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Dissertatsiya bilan Yadro fizikasi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (_____ raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, YaFI. Tel. (+99871) 289-31-19.

Dissertatsiya avtoreferati 2023-yil " ____ " _____ kuni tarqatildi.
(2023-yil " ____ " _____ dagi _____ raqamli reyestr bayonnomasi).

M.Yu. Tashmetov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash raisi f.-m.f.d., professor

O.R. Tojiboyev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash ilmiy kotibi, f.-m.f.PhD,
katta ilmiy xodim

E.M. Tursunov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash huzuridagi ilmiy seminar raisi
f.-m.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. So‘nggi yillarda dunyoda vismut silikat ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) va vismut germanat ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$) va paratellurit (TeO_2) kristallari sanoat, fan va texnikada fizik xususiyatlar va texnologik parametrlarning umumiyliigi bo‘yicha optik akusto-optik va akustoelektron qurilmalarda ishchi muhitlar sifatida katta talabga egadir. Akusto-optika qurilmalarini yaratish uchun paratellurit kristallariga talab ko‘proq bo‘lib, ular sezilarli bo‘lgan yutilish chiziqlarisiz shaffoflikdarajasining keng diapazoniga (0,35–6,0 mkm) ega bo‘lib, suvda deyarli erimaydi. Oddiy va g‘ayrioddiy nurlarning sinish ko‘rsatkichlarining yuqori qiymatlari akustik to‘lqinlarning o‘ziga xos kichik tezliklari bilan birgalikda paratellurit kristallarini akusto-optik sifat koeffitsiyentining g‘ayrioddiy yuqori qiymati bilan ta‘minlaydi. Bu uning boshqa akusto-optik materiallarga nisbatan texnik jihatdan asosiy afzalligini belgilaydi va ularni akusto-optik elektron sozlanuvchi filtrlarda, dispersiyali kechiktirish liniyalari va optik nurlanishni boshqarish uchun akusto-optik o‘zgartirgichlarda faol ishchi muhit sifatida foydalanish imkonini beradi.

Biroq, akusto-optik uskunalarda kristallarning qo‘llanilishi chastotasi diapazonini cheklovchi muhim omillardan biri bo‘lib qayd etilgan kristallardagi akustik to‘lqinlarning so‘nish koeffitsiyentining qiymati va anizotropiyasi hisoblanadi, ular shu kungacha batafsil o‘rganilmagan. Shuning uchun asosiy vazifalardan biri eng kam darajada akustik yo‘qotishlarga erishiladigan kristall tovush o‘tkazgichlarning bunday yo‘nalishlarini aniqlashdir. Umuman olganda, bu kristallarning elastik xossalarning anizotropiyasini o‘rganish chiziqli bo‘lmagan akustika va chiziqli bo‘lmagan optikaning ko‘plab masalalari uchun ham muhim ahamiyatga ega. Fundamental qiziqishdan tashqari bunday tadqiqotlar ushbu kristallarning akusto-optik va golografik qurilmalarda faol ishchi muhit sifatida qo‘llanilishi uchun eng samarali kesimlarini aniqlash uchun muhim ahamiyatga ega, va shubhasiz, zamonaviy kondensirlangan holat fizikasi uchun ham dolzarb hisoblanadi.

So‘nggi yillarda O‘zbekiston Respublikasi materialshunoslik sohasidagi fundamental tadqiqotlarga - yangi materiallarni izlash va ma‘lum bo‘lgan materiallarning xossalarni, shu jumladan mamlakat iqtisodiyotining turli tarmoqlarida qo‘llaniladigan dielektrik va segnetoelektrik kristallarning xossalarni o‘rganishga katta e‘tibor qaratilmoqda. Ushbu fundamental va amaliy tadqiqotlarning yo‘nalishlari ilm-fan va ilmiy hajmdagi ishlab chiqarishni rivojlantirish uchun katta ahamiyatga ega va yangi 2022-2026 yillarga mo‘ljallangan O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida¹ o‘z aksini topgan.

Ushbu dissertatsiya ishida olib borilgan tadqiqotlar, muayyan darajada, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son “2022-2026-yillarga mo‘ljallangan yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi

¹O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-sonli “2022 - 2026 yillarga mo‘ljallangan yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risidagi Farmoni

to'g'risida"gi, 2017 yil 26 maydagi PF-3012-sonli "Qayta tiklanuvchi energiyani yanada rivojlantirish, 2017-2021 yillarda iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohalarida energiya samaradorligini oshirish chora-tadbirlari dasturi to'g'risida" Farmonlari, 2017 yil 17 fevraldagi PQ-2789-sonli "O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi faoliyatini yanada takomillashtirish, ilmiy-tadqiqot faoliyatini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirish chora-tadbirlari to'g'risida" Qarori hamda ushbu sohada qabul qilingan boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlantirishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur dissertatsiya ishi respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining II. "Energetika, energotejamkorlik va muqobil energiya manbalari" ustuvor yo'nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. So'nggi o'n yilliklarda kondensirlangan holatlar, shu jumladan, lazer kristallarining akustik va akusto-optik xususiyatlarini o'rganishga dunyoning yetakchi olimlari, jumladan rossiyalik (Yu.V.Gulyaev, V.I.Balakshiy, V.B.Voloshinov, I.E. Kuznetsova, V.V. Lemanov va bosh.), amerikalik (R. Truell, B. Chick, C. Elbaum), fransuz (E. D'yelesan va D.Ruaye), belorus (V.N.Beliy, G.V.Kulak va bosh.), o'zbekistonlik (P.K. Xabibullaev, S.Z.Mirzaev, Z.T.Azamatov, D.I.Semenov, F.R.Axmedjanov va bosh.) va boshqa olimlarning bir qator tajribaviy va nazariy ishlari bag'ishlangan.

Masalan, rossiyalik olimlarning ilmiy ishlarida yorug'likning anizotrop difraktsiyasida paratelluritning akusto-optik xossalari va ular asosida polarizatsiya modulyatorlari tadqiqot qilingan; belorusiyalik olimlar tomonidan silikat va germanat vismut kristallarida tovushda yorug'likning Breg difraktsiyasi va akusto-optik o'zaro ta'sirida ulardagi amplituda va faza ta'siri tadqiqot qilingan; fransiyalik olimlar tomonidan turli anizotrop tuzilmalar va kristallarda, shu jumladan silikat va germanat vismut va paratellurit kristallarida akustik to'lqinlarning tarqalishi o'rganilgan, O'zbekiston olimlari tomonidan akustik usullar yordamida kristallar va nanosuyuq tizimlarning akustik va akusto-optik xususiyatlari bo'yicha keng miqyosli tadqiqotlar olib borilgan.

Biroq, elastik xususiyatlar anizotropiyasi va ayniqsa, silikat va germanat vismut va paratellurit kristallarida akustik to'lqinlarning so'nishi anizotropiyasini batafsil o'rganish deyarli amalga oshirilmagan, ularning elastik xossalari oid mavjud ma'lumotlar esa bir-biriga ziddir. Shu bilan birga, kristallarda akustik to'lqinning tarqalish va so'nish tezligi ularning akusto- elektron va akusto-optik qayta ishlash tizimlarida qo'llanilishining texnologik imkoniyatlari bilan funktsional jihatdan bevosita bog'liq. Umuman olganda, akustik to'lqinlarning so'nishi mexanizmlari va elastik xossalarning anizotropiya qonunlari haqida fundamental bilimlarga ega bo'lish, shuningdek, akustik to'lqinlarning tarqalish yo'nalishining o'zgarishi bilan bu xossalarning o'zgarishini prognozlash kondensirlangan holat fizikasining dolzarb masalasi bo'lib hisoblanadi.

Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti ilmiy

tadqiqot loyihalari doirasida OT-F2-56 “Nodir yerlarning LnF_3 superionli trifluoridlarida issiqlik o‘tkazilishining ichki harakati va to‘lqinli shakli” (2017-2020) mavzusida va O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021 yil 13 iyuldagi PF-6260-sonli Farmoniga ko‘ra Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutining ilmiy tadqiqot ishlari dasturi doirasida “Chiziqli bo‘lmagan hodisalar, dielektrik va segnetoelektrik kristallarda elastik, fotoelastik va superion xossalarning faza o‘tishlari va anizotropiyasi” (2021-2024) mavzusida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi silikat vismut, germanat vismut va paratellurit kristallarning elastik xossalari kristallografik yo‘nalish ta‘sirining qonuniyatini aniqlashtirishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

chastotalarning gipertovush diapazonidagi silikat va germanat vismut va paratellurit kristallarida akustik to‘lqinlarning simmetriya o‘qlari bo‘ylab tezligi qiymatlarini va so‘nish koefitsientini eksperimental aniqlash.

paratellurit va silikat va germanat vismut kristallarida yuqori chastotali akustik to‘lqinlarning tezligi va so‘nishi anizotropiyasining qonuniyatini belgilash;

ushbu kristallardagi p‘yezofaol akustik to‘lqinlarning so‘nish koefitsiyenti kattaligiga dielektrik yo‘qotishlarning ta‘sir mexanizmini aniqlash;

silikat va germanat vismut kubik kristallarida mavhum elastik doimiylar bo‘yicha anizotropiya parametrini kiritish va aniqlash;

akustik to‘lqinlarning tezligi va so‘nishining paratellurit kristallarda ularning simmetriya o‘qlaridan tarqalish yo‘nalishining kam darajada og‘ishida o‘zgarishining qonuniyatini aniqlash.

Tadqiqot ob‘yekti bo‘lib paratellurit va silikat va germanat vismut kristallarida akustik to‘lqinlarning tezligi va so‘nish koefitsiyentining anizotropiyasi hisoblanadi.

Tadqiqot predmeti sifatida paratellurit, silikat va germanat vismut kristallarida yuqori chastotali akustik to‘lqinlarning tarqalish tezligi va so‘nish koefitsiyenti olingan.

Tadqiqot usullari: materiallarda akustik to‘lqinlarning tezlik hamda ularning so‘nish koefitsiyentini akusto-optik va takomillashtirilgan impulsi interferensiya o‘lchash usullari.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

birinchi marta silikat vismut, germanat vismut va paratellurit markazlashtirilmagan kristallar uchun kompleks elastik tensorning barcha mustaqil haqiqiy va mavhum komponentlari tajriba yo‘li bilan aniqlangan;

kub strukturali kristallarda akustik to‘lqinlarning so‘nish koefitsiyenti anizotropiya darajasini kristallardagi kristallografik yo‘nalishga bog‘likligini aniqlash imkonini beruvchi mavhum akustik anizotropiya parametri kiritilgan;

piezoelektrik kristallardagi dielektrik yo‘qotishlar anizotropiya xarakterini o‘zgartirmasdan, piezoaktiv akustik to‘lqinlarning so‘nish koefitsiyentlarining anizotropiya darajasini kuchaytirishi ko‘rsatilgan;

paratellurit kristallarida ikkinchi tartibli simmetriya o'qlari bo'ylab va yaqinida akustik to'lqinlarning tezligi va so'nish koeffitsiyenti anizotropiyasi qonuniyati olingan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

vismut germanat va vismut silikat kristallarida dielektrik o'lchashlarda qabul qilinishi mumkin bo'lmagan gipertovush chastota diapazonida dielektrik yo'qotishlarni topish uchun piezoaktiv va piezoaktiv bo'lmagan akustik to'lqinlar uchun so'nish koeffitsiyentlarining farqi aniqlangan;

paratellurit kristallarning optimal kesimlarini aniqlash uchun ulardagi ikkinchi darajali simmetriya o'qlardan ularning tarqalish yo'nalishining kichik burchakli og'ishlari uchun akustik to'lqinlarning tezligi va so'nish koeffitsiyentini hisoblash uchun tenglamalar olingan;

vismut germanat, vismut silikat va paratellurit kristallaridagi murakkab elastik tensorning olingan haqiqiy va mavhum komponentlari asosida ma'lumotlar to'plami yaratilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi qo'yilgan vazifalar kristallarda akustik to'lqinlarning tezligi va so'nishini o'lchashning yaxshi sinalgan usullaridan foydalanish, katta hajmdagi tajribaviy natijalar va ularning kondensirlangan holat fizikasining fundamental qonuniyatlari va asosiy tamoyillariga moslashtirilishi, shuningdek olingan natijalarning boshqa mualliflar tomonidan olingan natijalari bilan moslashtirilishi bilan fizik jihatdan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Natijalarning ilmiy ahamiyati markazlashtirilmagan simmetrik kristallar uchun mavhum elastik doimiylarga ko'ra elastik anizotropiya parametri birinchi marta joriy etildi, bu simmetriyaning bir yo'nalishi bo'ylab akustik to'lqinlarning so'nishi ma'lum qiymatlari bo'yicha nafaqat bo'ylama, balki ko'ndalang akustik to'lqinlarning boshqa kristolografik yo'nalishdagi so'nishini hisoblash yo'li bilan aniqlash imkonini beradi.

Tadqiqotlarni olib borish davomida olingan natijalar amaliy nuqtai nazardan, silikat va germanat vismut p'yezoelektrik kubik kristallarda va paratellurit tetragonal kristallarida akustik to'lqinlarning so'nishi anizotropiyasining umumiy tabiatini oldindan aytib berish va ularda akustoelektron va akusto-optik axborotni qayta ishlash qurilmalarida foydalanish uchun eng qulay kesimlarni aniqlash imkoniyatini beradi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. germanat va silikat vismut va paratellurit kristallarning elastik xossalarning anizotropiya qonuniyatlarini o'rganishda olingan natijalar asosida:

aniqlangan silikat va germanat vismut kubik markazlashtirilmagan simmetrik kristallarining mustaqil haqiqiy va murakkab elastik tenzorning mavhum komponentlari «Namosys Ltd» (Isroil) kompaniyasining NGA1556789-sonli "Optik spektr tahlili uchun fotodiodli massiv bilan birgalikda signalni qayta ishlashni optimallashtirish" loyihasi doirasida foydalanildi (2019–2021) («Namosys Ltd» (Isroil) kompaniyasining 2022 yil 12 iyundagi xati). Natijalarning qo'llanilishi optik

signallarni qayta ishlashning aniqligini oshirish va yo‘qotishlarni 30 dB darajasigacha kamaytirish imkonini yaratgan;

silikat vismut va germanat vismut kristallari uchun mavhum elastik doimiylar bo‘yicha akustik anizotropiyaning aniqlangan omili horijiy tadqiqotchilar tomonidan foydalanilgan (xalqaro ilmiy jurnallarda havolalar: Applied Surface Science 2022, Vol. 575, 151732; Nanomaterials 2022, 12 (22), 4101; Sensors & Transducers. 2021, Vol. 254, Issue 7, p.38-42). Natijalarning qo‘llanilishi silikat vismut asosida yuqori samarali fotokatalitik nanomaterialini olish va lantan gallosilikat kristallarining elastik xossalarini tavsiflash imkonini bergan;

dielektrik yo‘qotishlarning silikat vismut va germanat vismut va paratellurit markazlashtirilmagan simmetrik kristallarda akustik so‘nishlarga qo‘shgan hissasini hisobga olish zarurati horijiy tadqiqotchilar tomonidan qo‘llanilgan (xalqaro jurnallarda havolalar: Applied Surface Science 2022, Vol. 575, 151732; Nanomaterials 2022, 12 (22), 4101; Sensors & Transducers. 2021, Vol. 254, Issue7, p.38-42). Natijalarning qo‘llanilishi silikat vismut asosida yuqori effektiv fotokatalitik nanomaterialini olish va lanthan gallosilikat kristallarining elastik xossalarini tavsiflash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarini aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 9 ta xalqaro va respublika anjumanlarida ma’ruza qilingan hamda muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarini e’lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 16 ta ilmiy ish e’lon qilingan, ulardan Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 6 ta maqola, shulardan, 3 tasi xorijiy jurnallarda.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to‘rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidan tashkil topadi. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 105 betdan iborat.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi asoslanadi, tadqiqotlarning O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalarni rivojlantirishning asosiy ustuvor yo‘nalishlari bilan bog‘liqligi aniqlandi, muammoning o‘rganilganlik darajasi ko‘rib chiqildi, tadqiqotning maqsadi va vazifalari ishlab chiqildi. Tadqiqotning ob‘yekt, predmeti va usullari, ilmiy yangiligi bayon etildi, olingan natijalarning ishonchliligi tasdiqlandi, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berildi, ishning natijalari va aprobatsiya natijalarining qo‘llanilishiga oid ma’lumotlar, shuningdek dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi to‘g‘risida ma’lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Kristallarda akustik to‘lqinlar nazariyasi”** birinchi bobida kristallarda akustik to‘lqinlar nazariyasi va ularning elastik xossalariga p‘yezoelektrik ta’sirining ta’siri sharhi keltirilgan. Kristallarning elastik anizotropiyasiga asoslangan barcha asosiy ta’sirlar ko‘rib chiqilgan. Birinchi bobning alohida bo‘limi dielektrik va segnetoelektrik kristallarga xos bo‘lgan asosiy

soʻnish mexanizmlari boʻyicha adabiyotlarni sharhlashga bagʻishlangan. Ahiyezerning fonon-fononli mexanizmi va nuqtali nuqsonlarining akustik soʻnishga taʻsir mexanizmi batafsil koʻrib chiqilgan. Alohida boʻlim kristallarning elastik xossalari anizotropiyasini xarakteristik tezlik va soʻnish yuzalari boʻyicha tavsiflash nazariyasiga bagʻishlangan.

Koʻrib chiqishdan, germanat va vismut silikat va paratellurit kristallarining elastik xususiyatlari toʻgʻrisida mavjud boʻlgan koʻplab maʼlumotlarga qaramasdan, yuqori chastotali akustik toʻlqinlarning xususiyatlariga yoʻnaltirishga bogʻliq boʻlgan koʻplab masalalar oʻrganilmagan.

Dissertatsiyaning **“Usullar va eksperimental qurilmalar”** ikkinchi bobida anizotrop holatda akustik toʻlqinlarni oʻrganish usullarining umumiy tavsifi berilgan. Kristallarda akusto-optik oʻzaro taʻsirning asosiy qonuniyatlari, xususan, tovushda yorugʻlikning Breg difraksiyasi bobning ikkinchi boʻlimida keltirilgan.

Akustik xususiyatlarni aniqlashning akusto-optik usuli va akusto-optik oʻlchash tizimi bobning uchinchi boʻlimida batafsil koʻrib chiqilgan. Oʻlchashlarni oʻtkazish uchun yorugʻlikning Breg difraksiyasi usuli va 0,4-1,6 GHz chastota oraligʻidagi akustik toʻlqinlarni qoʻzgʻalish tizimidan va tovushda difraktsiyalangan yorugʻlikni roʻyxatdan oʻtkazish tizimidan (toʻlqinlar uzunligi 632,8 nm) iborat akusto-optik qurilmadan foydalanilgan.

Tovushda yorugʻlikning Breg difraksiyasidan foydalanadigan akustik toʻlqinlarning tarqalish xususiyatlarini oʻrganishning akusto-optik usullari θ_B yorugʻlikning Breg difraksiya burchagi V akustik toʻlqinining tarqalish tezligi va uning v chastotasi bilan quyidagi munosabat bilan bogʻlanganligiga asoslanadi:

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda_0 \cdot v}{2V} \quad (1)$$

Quvvati boʻyicha soʻnish koeffitsiyenti deb ataluvchi α soʻnish koeffitsiyenti quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$\alpha, dB/sm = \frac{1}{x_2 - x_1} 10 \lg \frac{I(x_1)}{I(x_2)} \quad (2)$$

bu yerda $I(x_1)$ va $I(x_2)$ akustik toʻlqinning tarqalish yoʻnalishi boʻylab x_1 va x_2 nuqtalarida mos ravishda difraktsiyalangan yorugʻlikning intensivligi.

Ushbu bobning toʻrtinchi boʻlimi "impulsli interferensiyasi" usuli bilan akustik toʻlqinlarning tezligi va soʻnishini pretsizion aniqlash uchun Villyams Lemb usuli asosida ishlab chiqilgan qurilmaga bagʻishlangan. Qurilmaning oʻziga xos xususiyati maʼlum bir vaqt oraligʻida ochiladigan amplitudali selektor - vaqt boʻyicha oʻtkazish oynasidir. A_1 va A_2 - qoʻshni impulsning amplitudalarini oʻlchash orqali akustik toʻlqinlarning α soʻnish koeffitsiyenti (2) formula yordamida aniqlanadi. Oʻlchash tizimi akustik impulsning ikki seriyasini hosil qilishga ham imkon beradi. Impulsning bu seriyalari qoʻllanilganda ularning umumiy amplitudasi bu impulsni toʻldiruvchi tebranishlar orasidagi fazalar farqiga bogʻliq boʻladi. Signal amplitudalarining interferensiya nollarini kuzatish orqali akustik toʻlqin tezligini aniqlash mumkin:

$$V = 2L \cdot \Delta v \quad (3)$$

bu yerda L - namunaning uzunligi, Δv - qarshi fazali interferentsiyaga mos generatorning ikkita chastotasi o'rtasidagi farq. Shu bilan birga, signalning amplitudali va vaqt bo'yicha tezligini aniqlashning aniqlik darajasi $\sim 0,01\%$ ni tashkil qiladi.

Ikkinchi bobning beshinchi bo'limida o'rganilgan namunalarning umumiy xususiyatlari va tajriba metodikasi ko'rib chiqilgan. Parallelepipedlar ko'rinishidagi namunalar [100], [001] va [110] kristallofizik yo'nalishlar bo'ylab uzun tomoni bilan 1 gradusgacha aniqlik bilan yo'naltirilgan. Parallelepipedning uzun tomoni bo'ylab olingan namunalar o'lchami 1 sm dan 2 sm o'zgargan. Namunalardagi bo'ylama va ko'ndalang akustik to'lqinlar 30 dan 50 MHz gacha shaxsiy chastotalar bilan, mos ravishda, kvartsdan yasalgan p'yezoelektrik o'zgartirgichlar yordamida qo'zg'atilgan.

Dissertatsiyaning **“Silikat vismut va germanat vismut kristallarining elastik xossalari anisotropiyasi”** uchinchi bobi birinchi bo'limida silikat vismut ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) va germanat vismutning ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$) o'rganilgan kristallari tavsiflangan, ular 23-nuqtali simmetriya guruhiga mansub, p'yezoelektrik ta'sirga ega, spektrning ko'zga ko'ringan sohasida shaffof va katta elektromexanik bog'lanish koeffitsiyentiga ega.

Ikkinchi bo'limda **“Silikat vismut kristallarining elastik xossalari anisotropiyasi”** xona haroratida 1 GHz chastotada silikat vismut kristallaridagi akustik to'lqinlarning tezligi va so'nish koeffitsiyentini o'lchash natijalari keltirilgan (1-jadval). Unda q va γ mos ravishda to'lqin vektori va akustik to'lqinning polarizatsiyasi.

Kristallarning elastik xossalari elastiklikning tenzori bilan tavsiflanadi, u haqiqiy va mavhum komponentalar orqali yoziladi:

$$C_{ijkl} = C'_{ijkl} + C''_{ijkl}, \quad (4)$$

Ushbu komponentalar effektiv elastik doimiylar $c_{\phi\phi}$ uchun ifodaga kiritilgan bo'lib, kristalldagi har qanday yo'nalish uchun mustaqil elastik doimiylar yordamida quyidagi formula yordamida osongina aniqlanadi:

$$c_{eff} = c'_{eff} + ic''_{eff} = c'_{ijkl}\kappa_j\kappa_l\gamma_i\gamma_k + ic''_{ijkl}\kappa_j\kappa_l\gamma_i\gamma_k, \quad (5)$$

(5) tenglamada $\kappa_{i,j}$ va $\gamma_{i,j}$ - to'lqin vektori va siljish vektorining yo'naltiruvchi kosinuslari. Bunday yondashuvda kristallda ixtiyoriy yo'nalish bo'ylab akustik to'lqinlarning tezligi va so'nish koeffitsiyenti quyidagi formulalar yordamida hisoblanadi:

$$V = \sqrt{\frac{c'_{eff}}{\rho}}, \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{1}{2}\omega \frac{c''_{eff}}{\rho V^2} = \frac{1}{2}\omega \frac{c''_{eff}}{c'_{eff}}, \quad (7)$$

Bi₁₂SiO₂₀ kristallarida akustik to‘lqinlarning effektiv elastik doimiylari, tezligi V va so‘nish ko‘effitsiyenti α

q	γ	V, 10 ³ m/s	α , dB/ μ s	c'_{eff} , 10 ¹⁰ N·m ⁻²	c''_{eff} , 10 ⁷ N·m ⁻²
[100]	[100]	3.77	3.20	13.01	3.05
	[001]	1.63	1.00	2.43	0.18
[110]	[110]	3.38	3.80	10.45	2.91
	[110]	2,33	0.85	4.97	0.31
	[001]	1.74	1.20	2.77	0.24
[111]	[111]	3.28	4.10	9.86	2.96
	[110]	2.12	0.92	4.11	0.28

bu yerda ρ - zichlik, V va ω - mos ravishda akustik to‘lqin tezligi va aylanma chastotasi. (7) formulada so‘nish ko‘effitsiyenti kompleks effektiv elastik doimiyning haqiqiy va mavhum komponentalari orqali ifodalanadi.

Natijada, bu yo‘nalishlar bo‘yicha barcha effektiv elastik konstantalar va elastik modullar tenzorining mustaqil haqiqiy va mavhum komponentalari dielektrik va p‘yezoelektrik ko‘effitsiyentlarni hisobga olgan holda aniqlandi. Ushbu hisoblashlar natijalari 1-jadvalda ham keltirilgan.

Haqiqiy va mavhum doimiylarning olingan qiymatlari c'_{11} , c''_{11} , c'_{12} , c''_{12} , c'_{44} , c''_{44} va (6) va (7) formulalar asosida haqiqiy va mavhum effektiv elastik doimiylarning anizotropiyasi, shuningdek (001) kristallografik tekislikdagi silikat vismut kristallaridagi tezligi va so‘nish ko‘effitsiyenti ko‘rib chiqilgan. Hisoblashlar natijalari 1 va 2-rasmlarda keltirilgan.

Elastik anizotropiyaning ikki parametrini kiritish mumkin: ham haqiqiy elastik modullar $\Delta c'$ bo‘yicha, ham mavhum elastik modullar bo‘yicha $\Delta c''$:

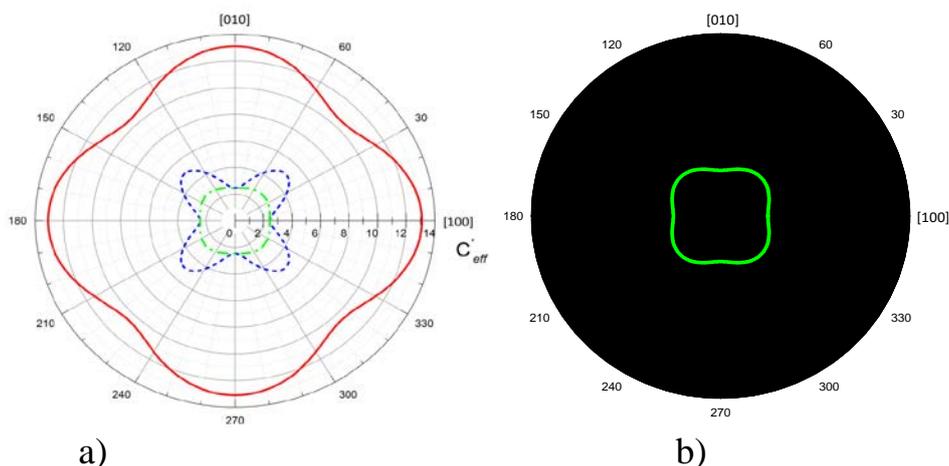
$$\Delta c' = c'_{12} + 2c'_{44} - c'_{11} \quad (8)$$

$$\Delta c'' = c''_{12} + 2c''_{44} - c''_{11} \quad (9)$$

2-jadvalda ushbu anizotropiya parametrlarining Bi₁₂SiO₂₀ kristallari uchun hisoblangan qiymatlari keltirilgan bo‘lib, ular manfiy ishoraga ega.

2-jadvaldan [100] yo‘nalish bo‘ylab akustik to‘lqinlarning so‘nish ko‘effitsiyentining qiymatini bilgan holda bu qiymatni boshqa kristallografik yo‘nalishlar bo‘yicha hisoblash mumkinligi ko‘rinib turibdi.

Shunday qilib, elastik anizotropiya ishorasiga ko‘ra barcha kubik kristallar ikki turga bo‘linadi: musbat anizotropiyali (I toifa) kristallar va ikkinchi tartibli elastik modullarning manfiy anizotropiyasi (II toifa) bilan kristallar. Kub qirralari tekisliklari yoki diagonal tekisliklarida yotgan to‘lqin vektorlari uchun akustik to‘lqinlar tezligining burchakli bog‘liqligi tahlili shuni ko‘rsatdiki, silikat vismut va germanat kubik kristallari elastik modullarning manfiy anizotropiyali kristallarga (II toifaga) mansub.



1-rasm. Haqiqiy effektiv elastik doimiyning anizotropiyasi (a) va (001) tekislikda BSO kristallarida kvazibo‘ylama (1), kvaziko‘ndalang (3) va sof ko‘ndalang (2) to‘lqinlar (b)

2-jadval

Anizotropiya parametrlari orqali $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ kristallarida bo‘ylama (L) va ko‘ndalang (S) to‘lqinlarining so‘nish koeffitsiyentlari o‘rtasidagi nisbatlar

c'_{eff} uchun ifodalar	$c'_{eff}, 10^{10} \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$	$\alpha, \text{ dB}/\mu\text{s}$	$c''_{eff}, 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$	Hisoblash formulasi
c_{11}	13.10	3.20	3.08	$\alpha_{100}^L = \frac{1}{2} \omega \frac{c''_{11}}{c'_{11}}$
c_{44}	2.45	1.01	0.18	$\alpha_{100}^S = \frac{1}{2} \omega \frac{c''_{44}}{c'_{44}}$
c_{12}	3.10		2.46	
$\frac{c_{11} + c_{12} + 2c_{44}}{2}$	10.55	3.90	2.95	$\alpha_{110}^{L_1} = \alpha_{100}^L \frac{(1 + \Delta c'' / 2c''_{11})}{(1 + \Delta c' / 2c'_{11})}$
$\frac{c_{11} - c_{12}}{2}$	5.00	0.93	0.31	$\alpha_{110}^{S_1} = \alpha_{100}^S \frac{(1 - \Delta c'' / 2c''_{44})}{(1 - \Delta c' / 2c'_{44})}$
$c_{44} + \frac{e_{14}^2}{\epsilon_0 \epsilon}$	2.79	1.31	0,25	$\alpha_{110}^{S_2} = \alpha_{100}^S \frac{1 + e_{14}^2 \text{tg} \delta / c'_{44} \epsilon \epsilon}{1 + e_{14}^2 \text{tg} \delta / c''_{44} \epsilon \epsilon}$
$\Delta c' = c'_{12} + 2c'_{44} - c'_{11}$	-4,10			
$\Delta c'' = c''_{12} + 2c''_{44} - c''_{11}$			-0,26	

Bunda bo‘ylama to‘lqinlarning tezligi [100] yo‘nalishda maksimal va [111] yo‘nalishda minimal bo‘ladi. Shu bilan birga, ko‘ndalang akustik to‘lqinlarning tezligi [110] yo‘nalishda maksimal va [100] yo‘nalishda minimal bo‘ladi. P’yezoelektrik ta’sirning ta’siri kvaziko‘ndalang to‘lqinlar tezligi anizotropiyasining biroz pasayishiga ta’sir qiladi, xolos.

Elastik modullarning tajribaviy va hisoblangan qiymatlari, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ va $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ kristallari uchun anizotropiya parametri va akustik to'liqin tezligi 3-jadvalda ko'rsatilgan. Shuni ko'rish mumkinki, faqat bitta [100] yo'nalish bo'yicha bo'ylama va ko'ndalang to'liqinlarning tezligi haqidagi bilimlar ushbu tezliklarni boshqa yo'nalishlar bo'yicha aniqlash imkonini beradi.

3-jadval

Anizotropiya parametri ΔC orqali kubik kristallardagi akustik to'liqinlar $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ va $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ o'rtasidagi nisbat

C_{eff}	$C_{eff}, 10^{10} \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$		Tezlikni hisoblash formulalari
	$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$	
C_{11}	12.8	13.10	$V_{[100]}^L = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}}$
C_{44}	2.57	2.45	$V_{[100]}^S = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}}$
$\frac{C_{11} + C_{12} + 2C_{44}}{2}$	10.4	10.55	$V_{[110]}^L = V_{[100]}^L \cdot \left(1 + \frac{\Delta C}{2C_{11}}\right)^{1/2}$
$\frac{C_{11} - C_{12}}{2}$	4.96	5.00	$V_{[110]}^{S_1} = V_{[100]}^S \cdot \left(1 - \frac{\Delta C}{2C_{44}}\right)^{1/2}$
$C_{44} + \frac{e_{14}^2}{\epsilon_0 \epsilon}$	2.85	2.79	$V_{[110]}^{S_2} = V_{[100]}^S \cdot$
$\frac{C_{11} + 2C_{12} + 4C_{44}}{3} + \frac{4e_{14}^2}{3\epsilon_0 \epsilon}$	9.98	10.15	$V_{[111]}^L = V_{[100]}^L \cdot \left(1 + \frac{\Delta C}{3C_{11}}\right)^{1/2}$
$\frac{C_{11} - C_{12} + C_{44}}{3}$	4.15	4.15	$V_{[111]}^S = V_{[100]}^S \cdot \left(1 - \frac{\Delta C}{3C_{44}}\right)^{1/2}$
$\Delta C = C_{12} + 2C_{44} - C_{11}$	-4,78	-5.10	

Germanat vismut kristallarida xona haroratida 1 GHz chastotada akustik to'liqinlarning tezligi va so'nish koeffitsiyentini o'lchash natijalari 4-jadvalda keltirilgan bo'lib, bunda q va γ mos ravishda akustik to'liqinning to'liqin vektori va polarizatsiyasi.

$\langle 110 \rangle$ o'qi bo'ylab p'yezofaol ko'ndalang to'liqinlar uchun p'yezoelektrik ta'siri ham haqiqiy c'_{44} va ham mavhum c''_{44} elastik doimiylarini "kuchaytiradi". Ushbu "kuchaytirilgan" doimiylar uchun formulalarga p'yezoelektrik modul e_{14} , dielektrik doimiy ϵ va dielektrik yo'qotish burchagi tangensi $tg \delta$ kiritiladi.

4-jadvalda berilgan elastiklikning tenzori haqiqiy va mavhum komponentalari yordamida har qanday kristallografik yo'nalish bo'ylab akustik to'liqinlarning tezligi va so'nishi qiymatlarini hisoblash mumkin. Simmetriya (001) va (110) tekisliklarida akustik to'liqinlarning $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ kristallardagi so'nishining hisoblangan yo'nalishi bog'liqliklari 2-rasmda ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki, piezoelektrik ta'sir akustik to'liqinlar so'nishining anizotropiyasini o'zgartirmagan holda, p'yezofaol ko'ndalang to'liqinlari uchun ushbu anizotropiyani yuqori darajada kuchaytiradi.

4-jadval

Bi₁₂GeO₂₀ kristallarida akustik to‘lqinlarning effektiv elastik doimiylari, tezligi V va so‘nish ko‘effitsiyenti α

q	γ	c _{eff}	V, 10 ³ m/s	c' _{eff} , 10 ¹⁰ N·m ⁻²	α, dB/μs	c'' _{eff} , 10 ⁷ N·m ⁻²
[100]	[100]	c ₁₁	3.72	12.8	2.60	2.44
	[001]	c ₄₄	1.67	2.57	0.60	0.11
		c ₁₂		2.88		1.60
[110]	[110]	$\frac{c_{11} + c_{12} + 2c_{44}}{2}$	3.36	10.4	2.80	2.14
	[110]	$\frac{c_{11} - c_{12}}{2}$	2.32	4.96	1.17	0.42
	[001]	$c_{44} + \frac{e_{14}^2}{\epsilon_0 \epsilon} \text{tg} \delta^*$	1.76	2.85	1.90	0.40
[111]	[111]	$\frac{c_{11} + 2c_{12} + 4c_{44}}{3} + \frac{4e_{14}^2}{3\epsilon_0 \epsilon} \cdot \text{tg} \delta^*$	3.29	9.98	3.29	2.41
	[110]	$\frac{c_{11} - c_{12} + c_{44}}{3}$	2.12	4.15	1.05	0.32

* - $\text{tg} \delta$ ko‘paytiruvchi faqat mavhum elastik doimiylar formulalarida paydo bo‘ladi.

Silikat va germanat vismut kristallaridagi so‘nish anizotropiyasini solishtirish uchun hisoblash natijalari 3-rasmda akustik to‘lqinlarning so‘nishi xarakteristik tekisliklari kesimi ko‘rinishida (001) tekisligida ko‘rsatilgan.

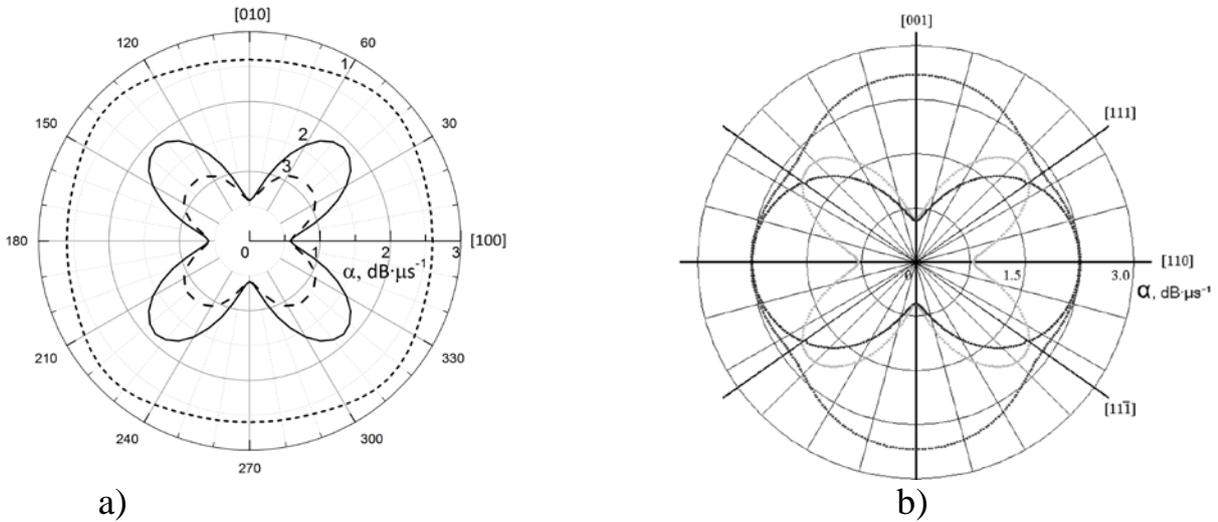
Shuni ko‘rish mumkinki, BSO kristallaridan farqli o‘laroq, BGO kristallarida ko‘ndalang to‘lqinlar so‘nishining kuchli anizotropiyasi kuzatiladi. 4-jadvalda berilgan formulalarga ko‘ra silikat vismut va germanat vismut kristallari uchun [111] bo‘ylab bo‘ylama to‘lqinlar va [110] bo‘ylab sekin harakatlanuvchi to‘lqinlari p‘yezofaol hisoblanadi va ular uchun dielektrik yo‘qotishlarning so‘nishga qo‘shgan hissasini hisobga olish kerak. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, bu hissa p‘yezofaol ko‘ndalang to‘lqinlar uchun [110] bo‘ylab germanat vismut kristallarida eng muhim ahamiyatga ega.

Kubik kristallarda akustik to‘lqinlar tezligining anizotropiyasi xususiyatlari uchun A' - deb nomlanuvchi akustik anizotropiya parametri qo‘llaniladi, ushbu parametrni haqiqiy deb olamiz va u kubik kristallar uchun quyidagicha aniqlanadi:

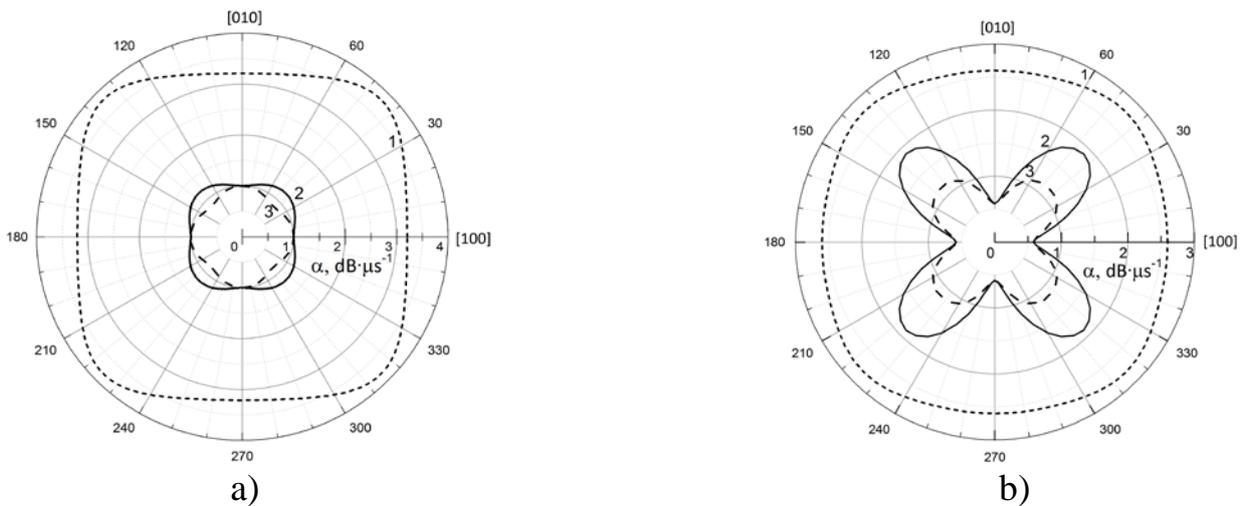
$$A' = \frac{c'_{11} - c'_{12}}{2c'_{44}} = \left(\frac{V_{110}^S}{V_{001}^S} \right)^2 \quad (10)$$

Biz bu parametrga o‘xshash akustik anizotropiya mavhum parametri A''-ni kiritdik. Bu parametr mavhum elastik doimiylar orqali aniqlanadi:

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



2-rasm. (001) tekislikda (a) kvazibo‘ylama (1), kvaziko‘ndalang (3) va sof ko‘ndalang (2) va (110) tekislikda (b) germanat vismut kristallarida to‘lqinlarning so‘nishi koeffitsiyentining anizotropiyasi



3-rasm. BSO (a) va BGO (b) kristallarida (001) tekislikdagi kvazibo‘ylama (1), kvaziko‘ndalang (3) va sof ko‘ndalang (2) to‘lqinlar so‘nish koeffitsiyentining anizotropiyasi

Biz kiritgan formulalardan ko‘rinib turibdiki, akustik anizotropiyaning bu parametrlari anizotropiyaning darajasi va tabiatini, tezligini, kub kristallarida akustik to‘lqinlarning so‘nishini tahlil qilish imkoniyatini beradi. Shunday qilib, masalan, akustik anizotropiya A'' ning mavhum parametrini bilish, bo‘ylama akustik to‘lqinlarning eng kam darajada so‘nishi qayd etiladigan kristallografik yo‘nalishni oldindan taxmin qilish mumkin. Bunda $[110]$ yo‘nalish bo‘ylab faqat ikkita ko‘ndalang to‘lqinning so‘nish koeffitsiyenti va tezligini oldindan o‘lchash kifoya, (10) va (11) formulalardan ushbu parametrlarni hisoblash mumkin.

To‘rtinchi bobda **“Paratellurit kristallarning elastik xossalari anizotropiyasi”** TeO₂ kristallarida akustik to‘lqinlarning tezligi va so‘nishi anizotropiyasini o‘rganish natijalari keltirilgan. Ushbu bobning birinchi bo‘limida **“Tajriba natijalari”** 5-jadvalda akustik to‘lqinlarning tezlik va so‘nish ko‘effitsiyentining o‘lchangan qiymatlari, shuningdek paratellurit kristallarda effektiv elastik doimiylar uchun formulalar keltirilgan. Taqqoslash uchun 5-jadvalda bu xususiyatlarning so‘zma-so‘z qiymatlari ham ko‘rsatilgan. Olingan natijalar elastik modullarning murakkab tenzorining haqiqiy va mavhum komponentalarini hisoblash uchun ishlatilgan bo‘lib, uning yordamida keyinchalik har qanday ixtiyoriy yo‘nalish bo‘yicha akustik to‘lqinlarning tezligi va so‘nishi aniqlanadi.

5-jadval

Paratellurit kristallarda akustik to‘lqinlarning tezligi va so‘nish ko‘effitsiyenti, $v = 1 \text{ GHz}$, $T = 293 \text{ K}$

q	γ	c_{eff}	$V, 10^3 \text{ m/s}$		$\alpha, \text{ dB}/\mu\text{s}$	
			Eksp.	Liter.	Eksp.	Liter.
[100]	[100]	c_{11}	3.07	3.05	3.4	3.0
	[001]	c_{44}	2.09	2.10	0.9	
	[010]	c_{66}	3.31	3.32	2.8	
[001]	[001]	c_{33}	4.23	4.20	2.6	2.4
	[100]	c_{44}	2.08	2.10	0.9	1.0
[110]	[110]	$(c_{11}+c_{12}+2c_{66})/2$	4.56	4.66	2.5	
	[110]	$(c_{11}-c_{12})/2$	0.62	0.61	16.0	12.4
	[001]	c_{44}	2.08	2.10	0.8	

To‘rtinchi bobning ikkinchi **“Paratellurit kristallarda to‘lqinlarning tezligi va so‘nish ko‘effitsiyentining anizotropiyasi”** bo‘limida paratellurit kristallardagi akustik to‘lqinlarning tezligi va so‘nishi anizotropiyasidagi qonuniyatlarni o‘rganish natijalari keltirilgan. Hisoblashlar uchun akustik to‘lqinda energiyaning dissipatsiyasini hisobga oluvchi to‘lqin tenglamasi qo‘llanildi:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (c'_{ijkl} + ic''_{ijkl}) \frac{\partial^2 u_{kl}}{\partial x_j \partial x_l} \quad (12)$$

bu yerda u_i zarralarni ko‘chirish vektorining tarkibiy qismlari, u_{kl} – urg‘u tensorining tarkibiy qismlari, x_k – koordinatalar.

(12) tenglikni yassi garmonik to‘lqinning yaqinlashishida yechish orqali Kristoffel-Grin algebraik tengliklar tizimiga kelishimiz mumkin, bunda haqiqiy va mavhum qismlari uchun tengliklarni alohida ko‘rib chiqish zarur. Tenglikaning haqiqiy qismlari uchun (12) tenglik yordamida Kristoffel-Grin tengliklarning ma‘lum bo‘lgan tizimini olamiz, bu kristallardagi har qanday ixtiyoriy yo‘nalish bo‘ylab akustik to‘lqinlar tezligini aniqlashga imkon beradi:

$$[\Gamma_{ik} - \delta_{ik} \rho V^2] \gamma_k = 0 \quad (13)$$

bu yerda δ_{ik} - Kronecker tenzori, ρ - kristallning zichligi, V – akustik to‘lqinning faza tezligi, γ_k – birlik polarizatsiya vektorining tarkibiy qismlari.

(12) tenglamaning mavhum tomonlari uchun tenglikni yanada ko‘proq e‘tiborga olsak, biz Kristoffel tenzorining haqiqiy va mavhum komponentalari orqali yoki shakldagi haqiqiy va mavhum effektiv elastik doimiylar orqali so‘nish koefitsiyentini hisoblash uchun quyidagi formulalardan foydalanamiz:

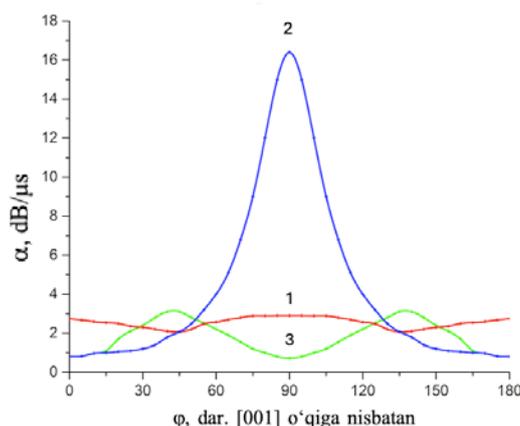
$$\frac{2\alpha\rho V^2}{\omega} = \Gamma''_{ik} \gamma_i \gamma_k = c''_{\alpha\phi\phi} \quad (14)$$

So‘nish koefitsiyentining anizotropiyasini hisoblash uchun ishda Java2SE dasturlash tilidagi dasturlardan foydalanildi. Boshlang‘ich ma‘lumotlar bu kristallardagi simmetriyaning asosiy o‘qlari bo‘ylab akustik to‘lqinlarning tezligi va pasayishining eksperimental qiymatlari bo‘ldi. (110) tekislikda tarqalayotgan chastotasi 1 GHz bo‘lgan bo‘ylama va ko‘ndalang akustik to‘lqinlarning anizotropiysi va pasayish koefitsiyentini hisoblash natijalari 4-rasmda ko‘rsatilgan.

4-rasmdan ko‘rib chiqilgan tekislikda kvaziko‘ndalang va sof ko‘ndalang akustik to‘lqinlarning so‘nish anizotropiyasi kvazibo‘ylama to‘lqinlarga qaraganda sezilarli darajada katta ekanligini ko‘rish mumkin.

Shunday qilib, tezlikning anizotropiyasi, qutblanish yo‘nalishi va kristallardagi akustik to‘lqinlarning so‘nish koefitsiyentini o‘rganish uchun, (6) va (7) tenglamalarni yechish zarur. Shunday qilib, masalan, (110) kristalografik tekislik uchun, sferik koordinatalar tizimida akustik to‘lqinning tarqalish yo‘nalishi ikki burchak bilan beriladi: ϕ va θ . Bu yerda ϕ - akustik to‘lqinning [100] o‘qiga nisbatan burchakni va θ - [001] o‘qiga nisbatan burchakni ko‘rsatadi. Bunday belgilashlar bilan to‘lqin frontiga normal burchaklarga quyidagi komponentalarga ega bo‘ladi:

$$\kappa_1 = \cos \phi \sin \theta \quad \text{va} \quad \kappa_2 = \sin \phi \sin \theta \quad \kappa_3 = \cos \theta$$



4-rasm. TeO₂ kristallarida 1 GHz chastotali kvazibo‘ylama (1), kvaziko‘ndalang (2) va sof ko‘ndalang (3) to‘lqinlarning sonish anizotropiyasi

(001) tekislikda mos ravishda yo‘naltiruvchi kosinuslar qiymatlari quyidagilarga teng:

$$n_1 = \cos \phi, \quad n_2 = \sin \phi, \quad n_3 = 0,$$

va Green-Christoffel tenzorining tarkibiy qismlari quyidagicha yozilgan:

$$\Gamma_{11}=c_{11}(\cos\varphi)^2 + c_{66}(\sin\varphi)^2; \quad \Gamma_{22}=c_{66}(\cos\varphi)^2 + c_{11}(\sin\varphi)^2 \quad \Gamma_{33}=c_{44}$$

$$\Gamma_{12}=\Gamma_{21}=(c_{12}+c_{66}) \cos\varphi \cdot \sin\varphi; \quad \Gamma_{13}=\Gamma_{31}=\Gamma_{23}=\Gamma_{32}=0$$

Natijada bir to'liqning tezligi $V=(c_{44}/\rho)^{1/2}$ -ga teng bo'lib, bu kristallning XOY uchigidagi polarizatsiyalangan to'liqlarning tezligi quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$V_{1,2}^2 = \frac{c_{11} + c_{66} \pm \sqrt{(c_{11} - c_{66})^2 \cos^2 2\varphi + (c_{12} + c_{66})^2 \sin^2 2\varphi}}{2\rho}. \quad (15)$$

Hisoblash natijalari 6-jadvallarda keltirilgan.

6-jadval

Paratellurit kristalllarda akustik to'liqlarning tezligi, so'nishi va effektiv doimiylari ($\nu=1$ vGHz)

q	γ	c_{eff}	$c'_{\text{eff}},$ 10^{10} N/m ²	$c''_{\text{eff}},$ 10^6 N/m ²	$V,$ 10^3 m/s	α	
						dB/ μ s	10^6 s ⁻¹
[100]	[100]	c_{11}	5.60	7.0	3.07	3.4	0,392
	[001]	c_{44}	2.67	0.9	2.09	0.9	0,104
	[010]	c_{66}	6.62	6.8	3.31	2.8	0,323
[001]	[001]	c_{33}	10.56	10.1	4.23	2.6	0,300
	[100]	c_{44}	2.67	0.9	2.08	0.9	0,104
[110]	[110]	$(c_{11}+c_{12}+2c_{66})/2$	11.99	12.45	4.56	2.5	0,288
	[110]	$(c_{11}-c_{12})/2$	0.225	1.35	0.62	16.0	1,84
	[001]	c_{44}	2.67	0.9	2.08	0.8	0,092

Hisoblashda quyidagi qiymatlar ishlatilgan: zichligi $\rho = 5,98 \cdot 10^3$ kg/m³ haqiqiy elastik koeffitsientlar $c'_{11}=5,6 \cdot 10^{10}$ N/m², $c'_{12}=5,15 \cdot 10^{10}$ N/m², $c'_{66}=6,62 \cdot 10^{10}$ N/m², $c'_{33}=10,56 \cdot 10^{10}$ N/m², $c'_{44}=2,67 \cdot 10^{10}$ N/m², $c'_{13}=2,17 \cdot 10^{10}$ N/m², mavhum elastic koeffitsientlar $c''_{11}=4,1 \cdot 10^6$ N/m², $c''_{12}=1,42 \cdot 10^6$ N/m², $c''_{66}=1,34 \cdot 10^6$ N/m², $c''_{33}=2,12 \cdot 10^6$ N/m², $c''_{44}=c_{m55}=1,1 \cdot 10^6$ N/m², $c''_{13}=1,58 \cdot 10^6$ N/m².

To'rtinchi bobning uchinchi bo'limda «Paratellurit kristalllarda simmetriya o'qlari yaqinidagi akustik to'liqlarning xarakteristikalarini hisoblash xususiyatlari» ishimizda olingan haqiqiy elastik doimiylarning qiymatlari va, shunga ko'ra, tezlikning qiymatlari adabiyotlarda keltirilgan qiymatlarga mos keladi. Lekin shu bilan birga (001) tekisligi uchun xato surat olinadi. Bu suratda, masalan, [100] va [010] o'qlari bo'ylab ko'ndalang akustik to'liq tezligining qiymati bo'ylama akustik to'liqning tezligidan kamroq, aslida aksincha bo'lishi kerak, chunki paratellur kristallardagi elastik doimiysi c_{66} elastik doimiysi c_{11} dan katta.

(001) tekislikida akustik to'liqlarning tarqalish holatida to'liq vektorining yo'naltiruvchi kosinuslari $\kappa_1=\cos\psi$, $\kappa_2=\kappa\sin\psi$, $\kappa_3=0$ ga teng bo'ladi.

Shunday qilib Kristoffel-Grin tenzorining komponentalari (mos ravishda haqiqiy va mavhumy) quyidagi shaklda yoziladi:

$$\Gamma_{11}=c_{11}(\cos\psi)^2 + c_{66}(\sin\psi)^2 \quad \Gamma_{22}=c_{66}(\cos\psi)^2 + c_{11}(\sin\psi)^2 \quad \Gamma_{33}=c_{44}$$

$$\Gamma_{12}=\Gamma_{21}=(c_{12}+c_{66}) \cos\psi \cdot \sin\psi \quad \Gamma_{13}=\Gamma_{31}=\Gamma_{23}=\Gamma_{32}=0$$

Ayniqsa, effektiv elastik konstantaning haqiqiy qismi shaklda yoziladi:

$$c'_{eff} = \frac{\Gamma'_{11} + \Gamma'_{12}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\Gamma'_{11} - \Gamma'_{22})^2 + 4\Gamma'^2_{12}} \quad (18)$$

Natijada, TeO₂ kristalli XOY tekislikida polarizatsiyalangan bo'ylama va yagona ko'ndalang to'lqinlarining faza tezligi formuladan aniqlanadi:

$$V_{1,2}^2 = \frac{c_{11} + c_{66} \pm \sqrt{(c_{11} - c_{66})^2 \cos^2 2\psi + (c_{12} + c_{66})^2 \sin^2 2\psi}}{2\rho} \quad (19)$$

Bog'liqlik (19) ikki to'lqinning tezligining qiymatlarini aniqlaydi, uning polarizatsiyasi XOY tekislikida yotadi. Bunda [100] va [010] (X va Y) o'qlar ekvivalent bo'lib, ular bo'ylama to'lqin tezligi har doim ko'ndalang to'lqin tezligidan kam bo'ladi

Ma'lumki, ushbu tekislikda tarqalish yo'nalishining o'zgarishi bilan bo'ylama to'lqin tezligi har doim ko'ndalang to'lqin tezligidan katta bo'ladi. Lekin, natijada, fizik xatolik olinadi, chunki X va Y o'qi (taxminan 4 daraja) yaqinidagi burchaklarning ma'lum bir tekisligida ko'ndalang to'lqin tezligi bo'ylama akustik to'lqin tezligidan katta bo'lishi kerak:

$$V_L = \sqrt{\frac{c'_{11}}{\rho}} < V_S = \sqrt{\frac{c'_{66}}{\rho}} \quad (20)$$

Uchinchi moddaning tezligi, e'tiborga olinayotgan tekislikga perpendikulyar polarizatsiyaga ega bo'lish (001), $V = (c_{44}/\rho)^{1/2}$ ga teng, ya'ni propagatsiya yo'nalishiga bog'liq emas. Burchaklarning belgilangan tekisligidagi tafovutni yo'qotish uchun, teylor seriyasi orqali ildiz ifodasini taxminiy hisoblash formulasini qo'lladik:

$$\sqrt{a^2 + h} \cong a + \frac{h}{2a} \quad (21)$$

Bizning holatda, $\varphi=5$ darajadan kam bo'lmagan burchaklarda bizda

$$c'_{eff_{1,2}} \cong \frac{(c'_{11} + c'_{66}) \pm \left[(c'_{11} - c'_{66}) + \frac{(c'_{12} + c'_{66})^2 - (c'_{11} - c'_{66})^2}{2(c'_{66} - c'_{11})} \sin^2 2\psi \right]}{2}, \quad (22)$$

Yoki, alohida:

$$c'_{eff_1} \cong c'_{11} + \frac{(c'_{12} + c'_{66})^2 - (c'_{11} - c'_{66})^2}{4(c'_{66} - c'_{11})} \sin^2 2\psi = c'_{11} + A \sin^2 2\psi \quad (23)$$

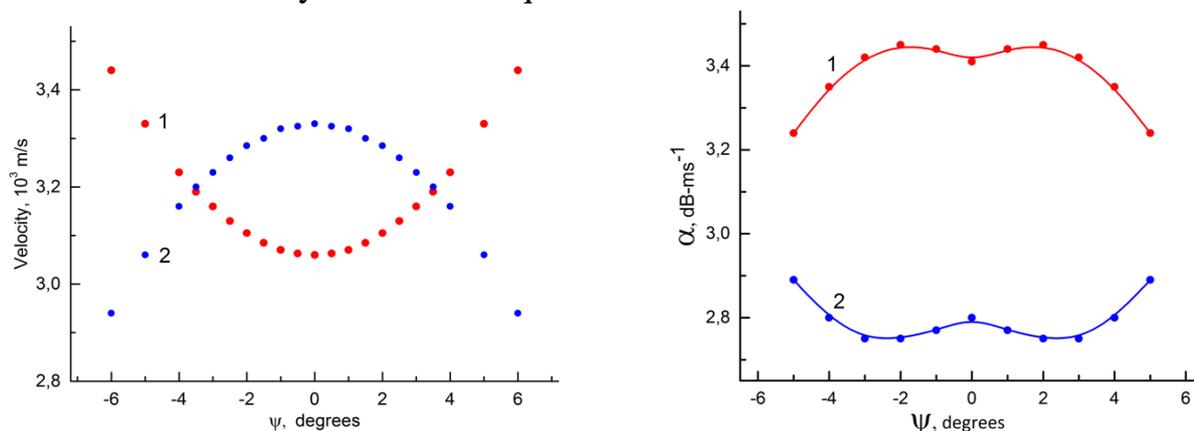
$$c'_{eff_2} \cong c'_{66} - \frac{(c'_{12} + c'_{66})^2 - (c'_{11} - c'_{66})^2}{4(c'_{66} - c'_{11})} \sin^2 2\psi = c'_{66} - A \sin^2 2\psi \quad (24)$$

bu yerda A koeffitsiyenti, haqiqiy elastik konstantalarning qiymatlarini almashtirgandan so'ng, $33.7 \cdot 10^{10}$ N/m² ni tashkil qiladi.

[100] yo'nalishga nisbatan 6 darajali burchaklar tekisligida (23) va (24) formulalarga ko'ra (001) tekislikda akustik to'lqinlarning bo'lama va ko'ndalang to'lqinlarining tezligi va so'nishini hisoblash natijalari 5-rasmda ko'rsatilgan.

Shuni ko'rish mumkinki, (23) va (24) formulalarga ko'ra, [100] o'qi (yoki [010]) ga yaqin burchaklardagi ko'ndalang to'lqinning tezligi bo'ylama to'lqinning tezligidan katta bo'ladi, bu esa effektiv elastik doimiylarning qiymatlaridan kelib

chiqadi. 3,5 gradusga teng va undan katta boʻlgan burchaklarda tezlik qiymatlari standart formulalar yordamida aniqlanadi.



5-rasm. (001) tekislikda (100) oʻqidan kichik ogʻishlar bilan boʻylama (1) va koʻndalang (2) toʻlqinlarining tezligi va soʻnish koeffitsienti

Shunday qilib, toʻlqin vektorining ogʻish burchaklari ichida akustik toʻlqinlarning toʻlqin vektorining [100] oʻqidan ± 4 darajaga qadar ogʻishi, soʻnish koeffitsiyentining oriyentatsiyaviy bogʻliqligi anomaliyasi, shuningdek, bu toʻlqinlarning tarqalish tezligi uchun ham kuzatiladi. Paratellerit kristallari yordamida qurilmalarni ishlab chiqishda qayd etilgan oʻgish hisobga olinishi kerak.

XULOSA

Falsafa doktori (PhD) ilmiy darajasini olish uchun bajarilgan “Germanat va silikat vismut hamda paratellurit kristallarida elastik xossalarning anizotropiya qonuniyatlari” mavzusidagi dissertatsiya ishi asosida amalga oshirilgan tadqiqotlar asosida quyidagi xulosalarni chiqarish mumkin.

1. Birinchi marta silikat va germanat vismut va paratellurit kristallarida kompleks elastiklik tenzorining barcha mustaqil haqiqiy va mavhum komponentalari aniqlandi va ularning asosida shu kristallarida akustik toʻlqinlarning tezligi va soʻnish koeffitsiyentining anizotropiya qonuniyat sirtlari ishlab chiqilgan.
2. Birinchi marta silikat va germanat vismut kristallarida akustik toʻlqinlarning soʻnish koeffitsiyentining anizotropiyasi qonuniyatlarini rasmiylashtirish ushun mavhum akustik anizotropiyasining parametri kiritilgan, va bu parametr shu kristallardagi akustik toʻlqinlarning soʻnish koeffitsiyentining anizotropiyasi qonuniyatlarini toʻgʻri tavsiflaydi.
3. Silikat va germanat vismut ham paratellurit kristallarida dielektrik yoʻqotishlar pʻezoaktiv akustik toʻlqinlarning soʻnish koeffitsiyentini oshiradi, lekin ular toʻlqinlarning tezligiga va soʻnish koeffitsiyentining umumiy anizotropiya qonuniyatlariga taʻsir qilmaydilar.

4. Germanat vismut kristallarining haqiqiy va mavhum akustik anisotropiya parametrlarining katta farqi akustik to'liqlarining so'nish koeffitsiyentiga dielektr yo'qotishlari ta'siri bilan bog'langanligi aniqlandi.
5. Birinchi marta simmetriya o'qlari yaqinidagi paratellurit kristallarda akustik to'liqlarning xususiyatlari taxminiy usuli bilan hisoblandi va bu usul ikkinchi darajali o'qlardan ularning tarqalish yo'nalishidagi kam darajadagi og'ishlarda akustik to'liqlarning tezligi va so'nish koeffitsienti o'zgarishlarning to'g'ri qonuniyatlarini aniqlash imkonini berdi.
6. Ko'rsatilganki, vismut germanat va vismut silikat kristallarida akustik anizotropiyaning mavhum parametri birlikdan qancha ko'p farq qilsa, akustik to'liqlarning sonish koeffitsiyenti kristallografik yo'nalishga shunchalik bog'liq.

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

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

САИДВАЛИЕВ УЛУГБЕК АЛИМЖАНОВИЧ

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ АНИЗОТРОПИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ В
КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНАТА И СИЛИКАТА ВИСМУТА И
ПАРАТЕЛЛУРИТА**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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

Ташкент – 2023

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2016.1. PhD/FM250

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

Мухторов Адил Позилович
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник

Ведущая организация: **Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2023 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 «__» _____ 2023 г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2023 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

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 кристаллы силиката висмута ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) и германата висмута ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$) и кристаллы парателлурита (TeO_2) по совокупности физических характеристик и технологических параметров являются широко востребованными в промышленности, науке и технике в качестве рабочих сред в оптических акустооптических и акустоэлектронных устройствах. Наиболее востребованными для создания устройств акустооптики являются кристаллы парателлурита, которые имеют широкий диапазон прозрачности (0,35– 6,0 мкм) без заметных полос поглощения, практически нерастворимы в воде. Высокие значения показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей в сочетании с уникально малыми скоростями акустических волн обеспечивают кристаллам парателлурита необычно большое значение коэффициента акустооптического качества. Это определяет его главное техническое преимущество перед другими акустооптическими материалами и позволяет использовать их в качестве активной рабочей среды в акустооптических электронно-перестраиваемых фильтрах, дисперсионных линиях задержки и акустооптических преобразователях для управления оптическим излучением.

Однако одним из существенных факторов, ограничивающих частотный диапазон применения кристаллов в акустооптических приборах, является величина и анизотропия коэффициента затухания акустических волн в указанных кристаллах, которые до настоящего времени детально не изучены. Поэтому одной из принципиальных задач является определение таких ориентаций кристаллических звукопроводов, при которых достигаются наименьшие акустические потери. В целом, исследование анизотропии упругих свойств этих кристаллов представляется важным также в интересах многих задач нелинейной акустики, нелинейной оптики. Такие исследования помимо фундаментального интереса важны для определения наиболее эффективных срезов этих кристаллов для применения в качестве активной среды в акустооптических и голографических устройствах, и, несомненно, являются актуальными для современной физики конденсированных сред.

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 и сегнетоэлектрических кристаллов, используемых в различных отраслях экономики страны. Направления этих фундаментальных и прикладных исследований имеют большое значение для развития науки и наукоемкого производства и отражены в Стратегии¹ развития нового Узбекистана на 2022–2026 годы.

¹Указ 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 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022 – 2026 годы», № УП-3012 от 26 мая 2017 года «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017-2021 годы», № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», 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 республики II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. В последние десятилетия исследованию акустических и акустооптических свойств конденсированных сред, включая лазерные кристаллы, был посвящен ряд экспериментальных и теоретических работ ведущих ученых мира, в том числе российских (Ю.В. Гуляев, В.И. Балакший, В.Б. Волошинов, И.Е. Кузнецова, В.В. Леманов и др.), американских (Р. Труэлл, Б. Чик, Ч. Эльбаум и др.), французских (Э. Дьелесан и Д. Руайе), белорусских (В.Н. Белый, Г.В. Кулак и др.) узбекистанских (П.К. Хабибуллаев, С.З. Мирзаев, З.Т. Азаматов, Д.И. Семенов, Ф.Р. Ахмеджанов и др.) и других.

Так в работах российских ученых были исследованы некоторые акустооптические характеристики парателлуриата при анизотропной дифракции света и модуляторы поляризации на их основе; белорусские ученые исследовали Брэгговскую дифракцию света на звуке в кристаллах силиката и германата висмута и амплитудно-фазовые эффекты в них при акустооптическом взаимодействии; французские ученые изучали распространение акустических волн в различных анизотропных структурах и кристаллах, включая кристаллы силиката и германата висмута и парателлуриата; учеными из Узбекистана были проведены масштабные исследования акустических и акустооптических свойств кристаллов и наножидкостных систем акустическими методами.

В то же время, детальные исследования анизотропии упругих свойств и особенно анизотропии затухания акустических волн в кристаллах силиката и германата висмута и парателлуриата практически отсутствуют, а имеющиеся данные по их упругим свойствам являются противоречивыми. Между тем, скорость распространения и затухание акустической волны в кристаллах напрямую функционально связаны с технологическими возможностями их применения в акустоэлектронных и акустооптических системах обработки информации. В целом, 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 является актуальной задачей физики конденсированного состояния.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ организаций, где выполнялась 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 июля 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 закономерностей влияния кристаллографической ориентации на упругие свойства кристаллов силиката висмута, германата висмута и парателлурита.

Задачи исследования:

экспериментально определить значения скорости и затухания акустических волн вдоль осей симметрии в кристаллах парателлурита, силиката висмута и германата висмута в гиперзвуковом диапазоне частот;

установить закономерности анизотропии скорости и затухания высокочастотных акустических волн в кристаллах парателлурита, силиката висмута и германата висмута;

определить механизм влияния диэлектрических потерь на величину коэффициента затухания пьезоактивных акустических волн в этих кристаллах;

вести и определить параметр анизотропии по мнимым упругим постоянным в кубических кристаллах силиката висмута и германата висмута;

выявить закономерности изменения скорости и затухания акустических волн при малых отклонениях направления их распространения от осей симметрии в кристаллах парателлурита.

Объектом исследования является анизотропия скорости и коэффициента затухания акустических волн в кристаллах парателлурита и силиката и германата висмута.

Предметом исследования являются скорость распространения и коэффициент затухания высокочастотных акустических волн в кристаллах силиката висмута, германата висмута и парателлурита.

Методы исследования: акустооптический и усовершенствованный импульсно-интерференционный методы измерения скорости акустических волн, а также их коэффициента затухания в материалах.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые экспериментально определены все независимые действительные и мнимые компоненты комплексного тензора упругости в нецентросимметричных кристаллах германата висмута, силиката висмута и парателлурита;

введен мнимый параметр акустической анизотропии, который позволяет предсказывать степень анизотропии коэффициента затухания акустических волн в зависимости от кристаллографической ориентации в кубических кристаллах;

показано, что в пьезоэлектрических кристаллах диэлектрические потери усиливают степень анизотропии коэффициента затухания пьезоактивных акустических волн, не изменяя характер анизотропии;

получена закономерность анизотропии скорости и коэффициента затухания акустических волн в кристаллах парателлурита вдоль и вблизи осей симметрии второго порядка.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

выявлены различия в величине затухания пьезоактивных и непьезоактивных акустических волн, которые определяют диэлектрические потери в кристаллах германата висмута и силиката висмута в гиперзвуковом диапазоне частот, недопустимом для диэлектрических измерений;

выведены уравнения для расчета скорости и коэффициента затухания акустических волн при малоугловых отклонениях направления их распространения от осей второго порядка в кристаллах парателлурита для нахождения оптимальных срезов в этих кристаллах;

создан набор справочных данных по полученным действительным и мнимым компонентам комплексного тензора упругости в кристаллах германата и силиката висмута и парателлурита.

Достоверность результатов исследования обуславливается физической обоснованностью поставленных задач, использованием хорошо апробированных методов измерения скорости и коэффициента 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 результатами других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в том, что впервые введен параметр упругой анизотропии по мнимым упругим постоянным для нецентросимметричных кубических кристаллов, который позволяет по известным значениям коэффициента затухания акустических волн вдоль одного симметричного направления, расчетным путем определять затухание не только продольных, а также поперечных акустических волн вдоль других кристаллографических направлений.

С точки зрения практики результаты, полученные в ходе работы, могут быть полезны для предсказания общего характера анизотропии затухания

акустических волн в пьезоэлектрических кубических кристаллах силиката висмута и германата висмута, тетрагональных кристаллах парателлурита и определения в них наиболее выгодных срезов для применения в реальных акустоэлектронных и акустооптических устройствах обработки информации.

Внедрение результатов исследования. На основании полученных результатов при исследовании закономерностей анизотропии упругих свойств кристаллов германата и силиката висмута и парателлурита:

определенные независимые действительные и мнимые компоненты комплексного тензора упругости в кубических нецентросимметричных кристаллах силиката и германата висмута использованы в рамках проекта компании Namosys Ltd. (Израиль) No. NGA1556789 «Оптимизация обработки сигналов в комбинации с фотодиодной матрицей для анализа оптического спектра» (2019-2021) (письмо компании Namosys Ltd. (Израиль) от 12 июня 2022). Использование результатов позволило повысить точность обработки оптических сигналов и снизить потери до уровня 30дБ;

определенный фактор акустической анизотропии по мнимым упругим константам для кристаллов силиката и германата висмута использован зарубежными исследователями (ссылки в международных научных журналах: Applied Surface Science 2022, Vol. 575, 151732; Nanomaterials 2022, 12(22), 4101; Sensors & Transducers. 2021, Vol. 254, Issue 7, p.38-42). Использование результатов позволило получить высокоэффективный фотокаталитический наноматериал на основе силиката висмута и объяснить упругие свойства кристаллов галлосиликата лантана;

необходимость учитывать вклад диэлектрических потерь в акустическое затухание в нецентросимметричных кристаллах силиката висмута и германата висмута и кристаллах парателлурита использована зарубежными исследователями (ссылки в международных журналах: Applied Surface Science 2022, Vol. 575, 151732; Nanomaterials 2022, 12(22), 4101; Sensors & Transducers. 2021, Vol. 254, Issue7, p.38-42). Использование результатов позволило повысить эффективность расчетов для получения высококачественных фотокаталитических наноматериалов на основе силиката висмута, а также для объяснения свойств кристаллов галлосиликата лантана.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, из них 6 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из которых 3 в зарубежных научных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 105 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе «Теория акустических волн в кристаллах» приведен обзор теории акустических волн в кристаллах и влияние пьезоэлектрического эффекта на их упругие свойства. Рассмотрены все основные эффекты, обусловленные упругой анизотропией кристаллов. Отдельный раздел первой главы посвящен обзору литературных работ по основным механизмам затухания, характерным для диэлектрических и сегнетоэлектрических кристаллов. Подробно рассмотрены фонон-фононный механизм Ахиезера и механизмы влияния точечных дефектов на акустическое затухание. Отдельный раздел посвящен теории описания анизотропии упругих свойств кристаллов характеристическими поверхностями скорости и затухания.

Во второй главе «Методы и экспериментальные установки» в первом разделе дана общая характеристика методов исследования акустических волн в анизотропных средах. Основные закономерности акустооптического взаимодействия в кристаллах, в частности Брэгговской дифракции света на звуке приведены во втором разделе главы.

Акустооптический метод определения акустических характеристик и акустооптическая измерительная система детально рассмотрены в третьем разделе главы. Для проведения измерений использовался метод Брэгговской дифракции света и акустооптическая установка, состоящая из системы возбуждения акустических волн в диапазоне частот 0,4-1,6 ГГц и системы регистрации света (длина волны 632,8 нм), дифрагированного на звуке.

Акустооптические методы исследования характеристик распространения акустических волн, использующие Брэгговскую дифракцию света на звуке, основаны на том, что угол Брэгговской дифракции света $\theta_{Б2}$ связан со скоростью распространения акустической волны V и с ее частотой ν соотношением:

$$\sin \theta_{Б} = \frac{\lambda_0 \cdot \nu}{2 \cdot V} \quad (1)$$

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

$$\alpha, \text{ дБ/см} = \frac{1}{x_2 - x_1} 10 \lg \frac{I(x_1)}{I(x_2)} \quad (2)$$

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

Четвертый раздел главы посвящен, разработанному на основе метода Вильямса–Лэмба, устройству прецизионного определения скорости и затухания акустических волн методом «импульсной интерференции». Особенностью устройства является амплитудный селектор, который открывается в определенный промежуток времени – временное окно пропускания. Путем измерения амплитуд соседних импульсов A_1 и A_2 определяется коэффициент затухания акустических волн α из соотношения (2). Измерительная система позволяет также формировать две серии акустических импульсов. При наложении этих серий импульсов их суммарная амплитуда зависит от разности фаз между заполняющими эти импульсы колебаниями. Наблюдая интерференционные нули амплитуд сигнала, можно определять скорость акустической волны:

$$V = 2L \cdot \Delta\nu \quad (3)$$

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 $\sim 0,01\%$.

В пятом разделе второй главы рассмотрены общие характеристики исследованных образцов и методика эксперимента. Образцы в виде параллелепипедов были ориентированы длинной стороной вдоль кристаллофизических направлений $[100]$, $[001]$ и $[110]$ с точностью до 1 градуса. Размеры образцов вдоль длинной стороны параллелепипеда варьировались от 1 см до 2 см. Продольные и поперечные акустические волны в образцах возбуждались пьезоэлектрическими преобразователями из кварца соответственно X - и Y-срезов, с собственными частотами от 30 до 50 МГц.

В третьей главе «Анизотропия упругих свойств кристаллов силиката висмута и германата висмута» в первом разделе дана характеристика исследованных кристаллов силиката висмута ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) и германата висмута ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$), которые относятся к точечной группе симметрии 23, обладают пьезоэлектрическим эффектом, прозрачны в видимой области спектра и обладают большим коэффициентом электромеханической связи.

«Во втором разделе «Анизотропия упругих свойств кристаллов силиката висмута» представлены результаты измерений скорости и коэффициента затухания акустических волн в кристаллах силиката висмута на частоте 1 ГГц при комнатной температуре (таблице 1). В ней q и γ – соответственно волновой вектор и поляризация акустической волны

Упругие свойства кристаллов описываются тензором упругости, который записывается через действительные и мнимые компоненты:

$$c_{ijkl} = c'_{ijkl} + c''_{ijkl}, \quad (4)$$

Таблица 1

Эффективные упругие константы, скорость V и коэффициент затухания α акустических волн в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$

\mathbf{q}	γ	V , 10^3 м/с	α , дБ/мкс	$c'_{\text{эфф}}$, 10^{10} Н·м ⁻²	$c''_{\text{эфф}}$, 10^7 Н·м ⁻²
[100]	[100]	3.77	3.20	13.01	3.05
	[001]	1.63	1.00	2.43	0.18
[110]	[110]	3.38	3.80	10.45	2.91
	[110]	2,33	0.85	4.97	0.31
	[001]	1.74	1.20	2.77	0.24
[111]	[111]	3.28	4.10	9.86	2.96
	[110]	2.12	0.92	4.11	0.28

Эти компоненты входят в выражение для эффективных упругих констант $c_{\text{эфф}}$, которые для любых направлений в кристалле легко определяются с помощью с помощью независимых упругих констант из соотношений:

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

где κ_j и γ_i -направляющие косинусы волнового вектора и вектора смещений. При таком подходе скорость и коэффициент затухания акустических волн вдоль произвольного направления в кристалле рассчитываются из соотношений:

$$V = \sqrt{\frac{c'_{\text{эфф}}}{\rho}}; \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \omega \frac{c''_{\text{эфф}}}{\rho V^2} = \frac{1}{2} \omega \frac{c''_{\text{эфф}}}{c'_{\text{эфф}}}, \quad (7)$$

где ρ - плотность, V и ω - соответственно, скорость и круговая частота акустической волны. В соотношении (7) коэффициент затухания выражается через действительную и мнимую компоненты комплексной эффективной упругой константы.

В итоге, были определены все эффективные упругие константы вдоль этих направлений и независимые действительные и мнимые компоненты тензора упругих модулей с учетом диэлектрических и пьезоэлектрических коэффициентов. Результаты этих расчетов также представлены в таблице 1.

На основе полученных значений действительных и мнимых констант c'_{11} , c''_{11} , c'_{12} , c''_{12} , c'_{44} , c''_{44} и выражений (6) и (7) рассмотрена анизотропия действительных и мнимых эффективных упругих констант, а также скорости и коэффициента затухания в кристаллах силиката висмута в

кристаллографической плоскости (001). Результаты проведенных расчетов приведены на рисунках 1 и 2.

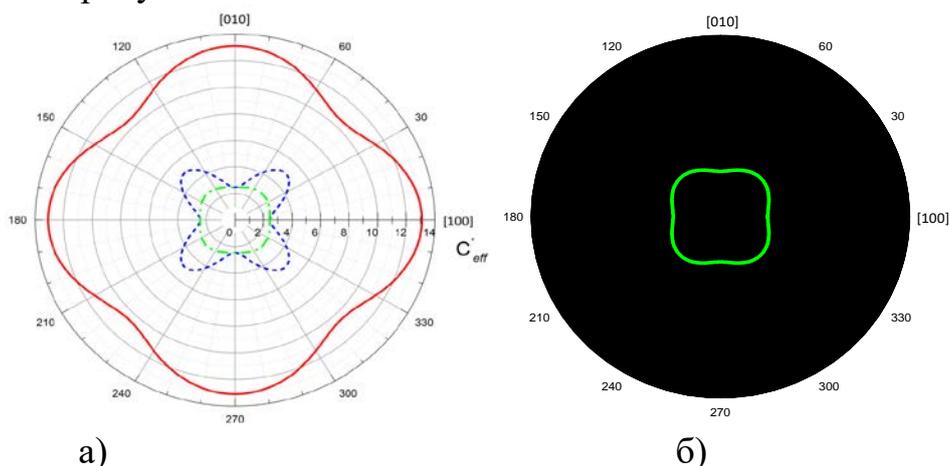


Рис. 1. Анизотропия действительной эффективной упругой константы (а) и затухания квазипродольных (1), квазипоперечных (3) и чистых поперечных (2) волн (б) в плоскости (001) в кристаллах BSO.

Можно ввести два параметра упругой анизотропии: как по действительным упругим модулям $\Delta c'$, так и по мнимым упругим модулям $\Delta c''$:

$$\Delta c' = c'_{12} + 2c'_{44} - c'_{11} \quad (8)$$

$$\Delta c'' = c''_{12} + 2c''_{44} - c''_{11} \quad (9)$$

В таблице 2 представлены рассчитанные значения этих параметров анизотропии для кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, которые отрицательны по знаку.

Как видно из таблицы 2, зная величину коэффициента затухания акустических волн вдоль направления [100], можно расчетным путем определить эту величину вдоль других кристаллографических направлений.

Таким образом, все кубические кристаллы в зависимости от знака параметра упругой анизотропии делятся на два типа: кристаллы с положительной анизотропией (тип I) и кристаллы с отрицательной анизотропией (тип II) упругих модулей второго порядка. Анализ угловых зависимостей скорости акустических волн для волновых векторов, лежащих в плоскостях граней куба или диагональных плоскостях, показал, что кубические кристаллы силиката и германата висмута относятся к кристаллам с отрицательной анизотропией упругих модулей (тип II).

В этом случае скорость продольных волн оказывается максимальной в направлении [100] и минимальной в направлении [111]. В то же время скорость поперечных акустических волн оказывается максимальной в направлении [110] и минимальной в направлении [100]. Влияние пьезоэффекта сказывается только на незначительном ослаблении анизотропии скорости квазипоперечных волн.

Таблица 2

Соотношения между коэффициентами затухания продольных (L) и поперечных (S) волн в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ через параметры анизотропии

Выражения для $c_{эфф}$	$c'_{эфф}$, $10^{10} \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$	α , дБ/мкс	$c''_{эфф}$, $10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$	Расчетные формулы
c_{11}	13.10	3.20	3.08	$\alpha_{100}^L = \frac{1}{2} \omega \frac{c''_{11}}{c'_{11}}$
c_{44}	2.45	1.01	0.18	$\alpha_{100}^S = \frac{1}{2} \omega \frac{c''_{44}}{c'_{44}}$
c_{12}	3.10		2.46	
$\frac{c_{11} + c_{12} + 2c_{44}}{2}$	10.55	3.90	2.95	$\alpha_{110}^{L_1} = \alpha_{100}^L \frac{(1 + \Delta c'' / 2c''_{11})}{(1 + \Delta c' / 2c'_{11})}$
$\frac{c_{11} - c_{12}}{2}$	5.00	0.93	0.31	$\alpha_{110}^{S_1} = \alpha_{100}^S \frac{(1 - \Delta c'' / 2c''_{44})}{(1 - \Delta c' / 2c'_{44})}$
$c_{44} + \frac{e_{14}^2}{\varepsilon_0 \varepsilon}$	2.79	1.31	0.25	$\alpha_{110}^{S_2} = \alpha_{100}^S \frac{1 + e_{14}^2 \text{tg} \delta / c'_{44} \varepsilon \varepsilon_0}{1 + e_{14}^2 \text{tg} \delta / c''_{44} \varepsilon \varepsilon_0}$
$\Delta c' = c'_{12} + 2c'_{44} - c'_{11}$	-4,10			
$\Delta c'' = c''_{12} + 2c''_{44} - c''_{11}$			-0,26	

Экспериментальные и рассчитанные значения упругих модулей, параметра анизотропии и скоростей акустических волн для кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ приведены в таблице 3. Видно, что знание скорости продольных и поперечных волн вдоль только одного направления [100] позволяет определять эти скорости вдоль других направлений.

Результаты измерений скорости и коэффициента затухания акустических волн на частоте 1 ГГц при комнатной температуре в кристаллах германата висмута представлены в таблице 4, в которой q и γ – соответственно волновой вектор и поляризация акустической волны.

Для пьезоактивных поперечных волн вдоль оси $\langle 110 \rangle$ пьезоэффект «ужесточает» как действительную c'_{44} , так и мнимую c''_{44} упругие константы.

В выражение для этих «ужесточенных» констант входят пьезоэлектрический модуль e_{14} , диэлектрическая проницаемость ε , и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$. С помощью действительных и мнимых компонент тензора упругости, приведенных в таблице 4, можно рассчитать значения скорости и затухания акустических волн вдоль любого кристаллографического направления. Рассчитанные ориентационные зависимости затухания акустических волн в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ в плоскостях симметрии (001) и (110) показаны на рисунке 2.

Таблица 3

Соотношения между скоростями акустических волн в кубических кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ через параметр анизотропии ΔC

$C_{\text{эфф}}$	$C_{\text{эфф}}, 10^{10} \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$		Расчетные формулы для скорости
	$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$	
C_{11}	12.8	13.10	$V_{[100]}^L = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}}$
C_{44}	2.57	2.45	$V_{[100]}^S = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}}$
$\frac{C_{11} + C_{12} + 2C_{44}}{2}$	10.4	10.55	$V_{[110]}^L = V_{[100]}^L \cdot \left(1 + \frac{\Delta C}{2C_{11}}\right)^{1/2}$
$\frac{C_{11} - C_{12}}{2}$	4.96	5.00	$V_{[110]}^{S_1} = V_{[100]}^S \cdot \left(1 - \frac{\Delta C}{2C_{44}}\right)^{1/2}$
$C_{44} + \frac{e_{14}^2}{\varepsilon_0 \varepsilon}$	2.85	2.79	$V_{[110]}^{S_2} = V_{[100]}^S \cdot$
$\frac{C_{11} + 2C_{12} + 4C_{44}}{3} + \frac{4e_{14}^2}{3\varepsilon_0 \varepsilon}$	9.98	10.15	$V_{[111]}^L = V_{[100]}^L \cdot \left(1 + \frac{\Delta C}{3C_{11}}\right)^{1/2}$
$\frac{C_{11} - C_{12} + C_{44}}{3}$	4.15	4.15	$V_{[111]}^S = V_{[100]}^S \cdot \left(1 - \frac{\Delta C}{3C_{44}}\right)^{1/2}$
$\Delta C = C_{12} + 2C_{44} - C_{11}$	-4,78	-4.10	

Видно, что пьезоэлектрический эффект, не меняя качественной картины анизотропии затухания акустических волн сильно усиливает эту анизотропию для пьезоактивных поперечных волн.

Чтобы сравнить анизотропию затухания в кристаллах силиката и германата висмута, результаты расчета приведены на рисунке 3 в виде сечения характеристических поверхностей затухания акустических волн плоскостью (001).

Видно, что, в отличие от кристаллов BSO, в кристаллах BGO наблюдается сильная анизотропия затухания поперечных волн. Для кристаллов силиката висмута и германата висмута согласно формулам, приведенным в табл. 4, продольные волны вдоль [111] и медленные поперечные волны вдоль [110] являются пьезоактивными и для них необходимо учитывать вклад диэлектрических потерь в затухание. Исследования показали, что этот вклад наиболее значителен в кристаллах германата висмута для пьезоактивных поперечных волн вдоль [110].

Для характеристики анизотропии скорости акустических волн в кубических кристаллах используется так называемый параметр акустической анизотропии A' , который назовем действительным и который для кубических кристаллов определяется следующим образом:

$$A' = \frac{c'_{11} - c'_{12}}{2c'_{44}} = \left(\frac{V_{110}^S}{V_{001}^S} \right)^2 \quad (10)$$

Таблица 4

Эффективные упругие постоянные, скорость V и коэффициент затухания α акустических волн в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

ρ	γ	Выражение $c_{\text{эфф}}$	V , 10^3 м/с	$c'_{\text{эфф}}$, 10^{10} Н·м ⁻²	α , дБ/мкс	$c''_{\text{эфф}}$, 10^7 Н·м ⁻²
[100]	[100]	c_{11}	3.72	12.8	2.60	2.44
	[001]	c_{44}	1.67	2.57	0.60	0.11
		c_{12}		2.88		1.60
[110]	[110]	$\frac{c_{11} + c_{12} + 2c_{44}}{2}$	3.36	10.4	2.80	2.14
	[110]	$\frac{c_{11} - c_{12}}{2}$	2.32	4.96	1.17	0.42
	[001]	$c_{44} + \frac{e_{14}^2}{\epsilon_0 \epsilon} \text{tg} \delta^*$	1.76	2.85	1.90	0.40
[111]	[111]	$\frac{c_{11} + 2c_{12} + 4c_{44}}{3} + \frac{4e_{14}^2}{3\epsilon_0 \epsilon} \cdot \text{tg} \delta^*$	3.29	9.98	3.29	2.41
	[110]	$\frac{c_{11} - c_{12} + c_{44}}{3}$	2.12	4.15	1.05	0.32

* - множитель $\text{tg} \delta$ появляется только в соотношениях для мнимых упругих констант.

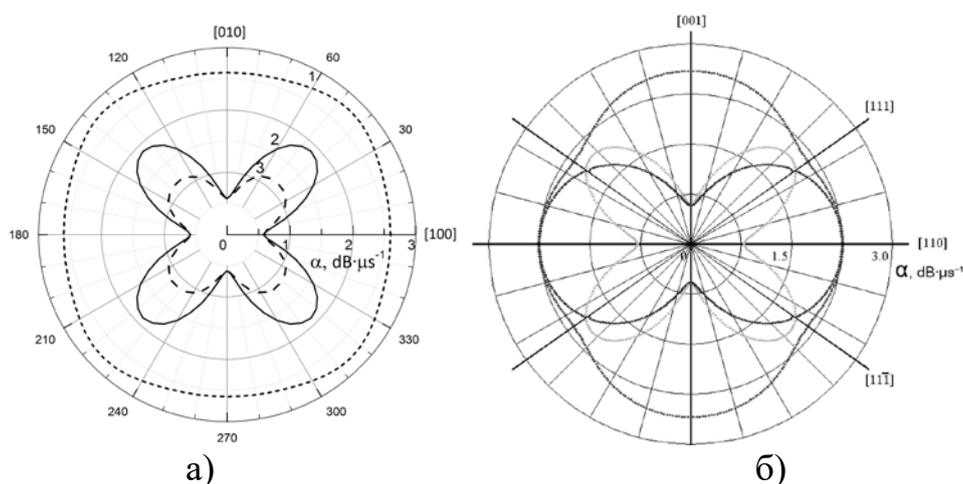


Рис. 2. Анизотропия затухания квазипродольных (1), квазипоперечных (3) и чистых поперечных (2) волн в плоскости (001) а) и в плоскости (110) б) в кристаллах германата висмута

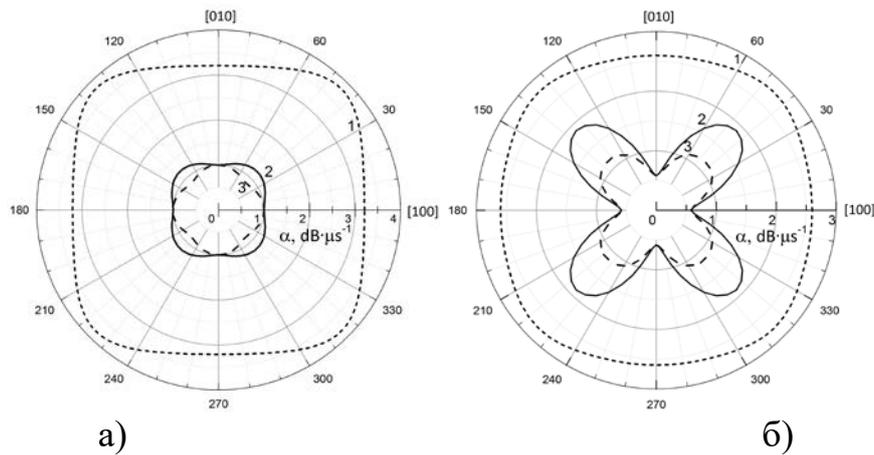


Рис. 3. Анизотропия затухания квазипродольных (1), квазипоперечных (3) и чистых поперечных (2) волн в плоскости (001) в BSO (а) и BGO (б) кристаллах

Аналогично этому параметру нами был введен мнимый параметр акустической анизотропии A'' , который определяется через мнимые упругие постоянные:

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

Как видно из введенных нами формул эти параметры акустической анизотропии позволяют анализировать степень и характер анизотропии скорости и затухания акустических волн в кубических кристаллах. Так, например, зная мнимый параметр акустической анизотропии A'' можно предсказать кристаллографические направления, вдоль которых будет наименьшее затухание акустических волн. При этом для этого достаточно предварительно измерить коэффициент затухания и скорость только двух поперечных волн вдоль направления $[110]$, и рассчитать эти параметры из выражений (10) и (11):

В четвертой главе «Анизотропия упругих свойств кристаллов парателлуриата» представлены результаты исследования анизотропии скорости и затухания акустических волн в кристаллах TeO_2 . В первом разделе этой главы «**Результаты эксперимента**» в таблице 5 приведены измеренные значения скорости и коэффициента затухания акустических волн, а также выражения для эффективных упругих констант в кристаллах парателлуриата. Для сравнения в таблице 5 приведены также литературные значения этих характеристик. Полученные результаты были использованы для расчета действительных и мнимых компонент комплексного тензора упругих модулей, с помощью которых в дальнейшем определяются скорость и затухание акустических волн вдоль любого произвольного направления.

Во втором разделе четвертой главы «**Анизотропия скорости и затухания акустических волн в кристаллах парателлуриата**» представлены результаты изучения закономерностей в анизотропии скорости и затухания акустических волн в кристаллах парателлуриата.

Таблица 5

Скорость и коэффициент затухания акустических волн в кристаллах парателлурита, $\nu = 1$ ГГц, $T = 293$ К

q	γ	$c_{эфф}$	$V, 10^3$ м/с		$\alpha, \text{дБ/мкс}$	
			Экспер.	Литер.	Экспер.	Литер.
[100]	[100]	c_{11}	3.07	3.05	3.4	3.0
	[001]	c_{44}	2.09	2.10	0.9	
	[010]	c_{66}	3.31	3.32	2.8	
[001]	[001]	c_{33}	4.23	4.20	2.6	2.4
	9[100]	c_{44}	2.08	2.10	0.9	1.0
[110]	[110]	$(c_{11}+c_{12}+2c_{66})/2$	4.56	4.66	2.5	
	[110]	$(c_{11}-c_{12})/2$	0.62	0.61	16.0	12.4
	[001]	c_{44}	2.08	2.10	0.8	

Для расчетов использовалось волновое уравнение, учитывающее диссипацию энергии в акустической волне:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (c'_{ijkl} + ic''_{ijkl}) \frac{\partial^2 u_{kl}}{\partial x_j \partial x_l} \quad (12)$$

где u_i – компоненты вектора смещения частиц, u_{kl} – компоненты тензора деформаций, x_k – координаты.

Решая уравнение (12) в приближении плоской затухающей гармонической волны, можно прийти к системе алгебраических уравнений Грина–Кристоффеля, в которых необходимо рассматривать отдельно равенства для действительных и мнимых частей уравнений. Используя уравнение (12) для действительных частей уравнения, получаем известную систему уравнений Кристоффеля–Грина, позволяющую определять скорость акустических волн вдоль любого произвольного направления в кристаллах:

$$[\Gamma_{ik} - \delta_{ik} \rho V^2] \gamma_k = 0 \quad (13)$$

где δ_{ik} – тензор Кронекера, ρ – плотность кристалла, V – фазовая скорость акустической волны, γ_k – компоненты единичного вектора поляризации.

Рассматривая далее равенство для мнимых частей уравнения (12) получаем выражения для расчета коэффициента затухания через действительные и мнимые компоненты тензора Кристоффеля или через действительные и мнимые эффективные упругие постоянные в виде:

$$\frac{2\alpha\rho V^2}{\omega} = \Gamma''_{ik} \gamma_i \gamma_k = c''_{эфф} \quad (14)$$

Для вычисления анизотропии затухания в работе использовалось программное обеспечение, на языке программирования Java2SE. Исходными данными служили экспериментальные значения скорости и затухания акустических волн вдоль основных осей симметрии в этих кристаллах. Результаты расчета анизотропии коэффициента затухания продольных и

поперечных акустических волн с частотой 1 ГГц, распространяющихся в плоскости (110) приведены на рисунке 4.

Из рисунка 4. видно, что в рассмотренной плоскости анизотропия затухания квазипоперечных и чистых поперечных акустических волн заметно больше, чем у квазипродольных волн.

Таким образом, для исследования анизотропии скорости, направления поляризации и коэффициента затухания акустических волн в кристаллах, необходимо решить уравнения (6) и (7). Так, например, для кристаллографической плоскости (110), в сферической системе координат направление распространения акустической волны задается двумя углами: φ и θ , где угол φ задает распространение упругой волны относительно оси [100], а угол θ - относительно оси [001]. При таких обозначениях нормаль к волновому фронту имеет компоненты:

$$\kappa_1 = \cos \varphi \sin \theta, \quad \kappa_2 = \sin \varphi \sin \theta \quad \text{и} \quad \kappa_3 = \cos \theta.$$

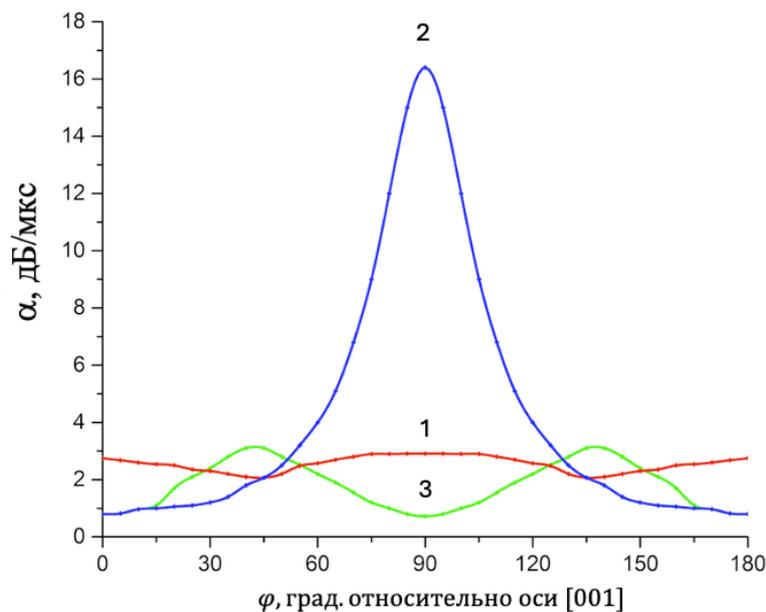


Рис. 4. Анизотропия затухания квазипродольных (1), квазипоперечных (2) и чистых поперечных (3) волн с частотой 1 ГГц в кристаллах TeO_2 в плоскости (110)

В плоскости (001) направляющие косинусы, соответственно, равны:

$$n_1 = \cos \varphi, \quad n_2 = \sin \varphi, \quad n_3 = 0,$$

и компоненты тензора Грина-Кристоффеля записываются в виде:

$$\Gamma_{11} = c_{11}(\cos \varphi)^2 + c_{66}(\sin \varphi)^2; \quad \Gamma_{22} = c_{66}(\cos \varphi)^2 + c_{11}(\sin \varphi)^2 \quad \Gamma_{33} = c_{44}$$

$$\Gamma_{12} = \Gamma_{21} = (c_{12} + c_{66}) \cos \varphi \sin \varphi; \quad \Gamma_{13} = \Gamma_{31} = \Gamma_{23} = \Gamma_{32} = 0$$

В результате, скорость одной волны, равна $V = (c_{44}/\rho)^{1/2}$ а скорости волн, поляризованных в плоскости XOY этого кристалла, определяются формулой:

$$V_{1,2}^2 = \frac{c_{11} + c_{66} \pm \sqrt{(c_{11} - c_{66})^2 \cos^2 2\varphi + (c_{12} + c_{66})^2 \sin^2 2\varphi}}{2\rho}. \quad (15)$$

Результаты расчета приведены в таблице 6.

Таблица 6

**Скорость и затухание акустических волн, и эффективные константы
кристаллов парателлурита ($\nu = 1$ GHz)**

q	γ	c_{eff}	$c'_{\text{эфф}},$ 10^{10} Н/м ²	$c''_{\text{эфф}},$ 10^6 Н/м ²	$V,$ 10^3 м/с	α	
						дБ/мкс	10^6 с ⁻¹
[100]	[100]	c_{11}	5.60	7.0	3.07	3.4	0,392
	[001]	c_{44}	2.67	0.9	2.09	0.9	0,104
	[010]	c_{66}	6.62	6.8	3.31	2.8	0,323
[001]	[001]	c_{33}	10.56	10.1	4.23	2.6	0,300
	[100]	c_{44}	2.67	0.9	2.08	0.9	0,104
[110]	[110]	$(c_{11}+c_{12}+2c_{66})/2$	11.99	12.45	4.56	2.5	0,288
	[110]	$(c_{11}-c_{12})/2$	0.225	1.35	0.62	16.0	1,84
	[001]	c_{44}	2.67	0.9	2.08	0.8	0,092

При расчете использовались следующие величины: плотность $\rho = 5,98 \cdot 10^3$ кг/м³ действительные упругие коэффициенты $c'_{11}=5,6 \cdot 10^{10}$ Н/м², $c'_{12}=5,15 \cdot 10^{10}$ Н/м², $c'_{66}=6,62 \cdot 10^{10}$ Н/м², $c'_{33}=10,56 \cdot 10^{10}$ Н/м², $c'_{44}=2,67 \cdot 10^{10}$ Н/м², $c'_{13}=2,17 \cdot 10^{10}$ Н/м², мнимые упругие коэффициенты $c''_{11}=4,1 \cdot 10^6$ Н/м², $c''_{12}=1,42 \cdot 10^6$ Н/м², $c''_{66}=1,34 \cdot 10^6$ Н/м², $c''_{33}=2,12 \cdot 10^6$ Н/м², $c''_{44}=c_{m55}=1,1 \cdot 10^6$ Н/м², $c''_{13}=1,58 \cdot 10^6$ Н/м².

В третьем разделе четвертой главы «**Особенности расчета характеристик акустических волн в кристаллах парателлурита вблизи осей симметрии**» показано, что полученные в работе значения действительных упругих констант и соответственно значения скорости совпадают с литературными, но при этом для плоскости (001) получается ошибочная картина, в которой, например, значение скорости поперечной акустической волны вдоль осей [100] и [010] меньше скорости продольной акустической волны, а должно быть наоборот, поскольку упругая постоянная в кристаллах парателлурита c_{66} больше c_{11} .

В случае распространения акустических волн в плоскости (001), направляющие косинусы волнового вектора волн, равны $\kappa_1=\cos\psi$, $\kappa_2=\sin\psi$, $\kappa_3=0$. Тогда компоненты (соответственно действительные и мнимые) тензора Грина-Кристоффеля запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= c_{11}(\cos\psi)^2 + c_{66}(\sin\psi)^2 & \Gamma_{22} &= c_{66}(\cos\psi)^2 + c_{11}(\sin\psi)^2 & \Gamma_{33} &= c_{44} \\ \Gamma_{12} &= \Gamma_{21} = (c_{12} + c_{66}) \cos\psi \cdot \sin\psi & \Gamma_{13} &= \Gamma_{31} = \Gamma_{23} = \Gamma_{32} & &= 0 \end{aligned}$$

В частности, действительная часть эффективной упругой постоянной запишется в виде:

$$c'_{\text{эфф}} = \frac{\Gamma'_{11} + \Gamma'_{22}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\Gamma'_{11} - \Gamma'_{22})^2 + 4\Gamma'^2_{12}} \quad (18)$$

В результате, фазовые скорости продольной и одной поперечной волн, поляризованных в плоскости [001], в кристалле TeO₂, определяются формулой:

$$V_{1,2}^2 = \frac{c_{11} + c_{66} \pm \sqrt{(c_{11} - c_{66})^2 \cos^2 2\psi + (c_{12} + c_{66})^2 \sin^2 2\psi}}{2\rho}. \quad (19)$$

Соотношение (19) определяет значения скоростей двух волн, поляризация которых лежит в плоскости XOY. При этом оси [100] и [010] (X и Y) равнозначны и вдоль них скорость продольной волны всегда меньше скорости поперечной волны

Получается, что с изменением направления распространения в этой плоскости скорость продольной волны всегда больше скорости поперечной. Но, в результате получается физическая ошибка, так как в определенном створе углов около осей X и Y (примерно ± 4 градуса) скорость поперечной волны должна быть больше скорости продольной акустической волны:

$$V_L = \sqrt{\frac{c'_{11}}{\rho}} < V_S = \sqrt{\frac{c'_{66}}{\rho}} \quad (20)$$

Скорость третьей моды, имеющей поляризацию, перпендикулярную рассматриваемой плоскости (001), равна $V=(c_{44}/\rho)^{1/2}$, то есть не зависит от направления распространения. Для устранения расхождения в указанном створе углов мы применили подход приближенных вычислений, используя формулу для приближенного вычисления корневого выражения через ряды Тейлора:

$$\sqrt{a^2 + h} \cong a + \frac{h}{2a} \quad (21)$$

В нашем случае, при углах φ менее 5 градусов имеем

$$c'_{эфф1,2} \cong \frac{(c'_{11} + c'_{66}) \pm \left[(c'_{11} - c'_{66}) + \frac{(c'_{12} + c'_{66})^2 - (c'_{11} - c'_{66})^2}{2(c'_{66} - c'_{11})} \sin^2 2\psi \right]}{2} \quad (22)$$

Или, отдельно:

$$c'_{эфф1} \cong c'_{11} + \frac{(c'_{12} + c'_{66})^2 - (c'_{11} - c'_{66})^2}{4(c'_{66} - c'_{11})} \sin^2 2\psi = c'_{11} + A \sin^2 2\psi, \quad (23)$$

$$c'_{эфф2} \cong c'_{66} - \frac{(c'_{12} + c'_{66})^2 - (c'_{11} - c'_{66})^2}{4(c'_{66} - c'_{11})} \sin^2 2\psi = c'_{66} - A \sin^2 2\psi, \quad (24)$$

где коэффициент А, после подстановки значений действительных упругих постоянных равен $33.7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$.

Результаты расчета скорости и затухания продольных и поперечных волн акустических волн в плоскости (001) по формулам (23) и (24) в створе углов ± 4 градуса относительно направления [100] показаны на рисунке 5.

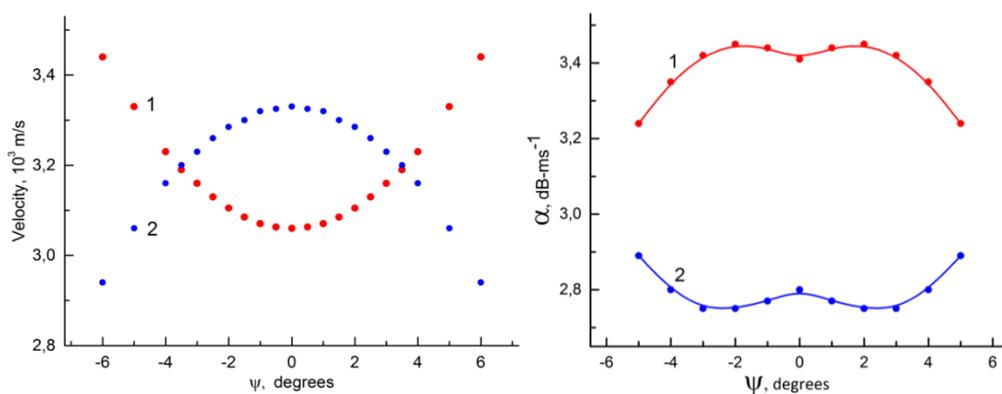


Рис. 5. Анизотропия скорости и затухания продольных (1) и поперечных (2) волн в плоскости (001) при малых отклонениях от оси [100]

Видно, что согласно формулам (23) и (24) при углах близких к оси X (или Y) скорость поперечной волны больше скорости продольной волны, как и следует из значений эффективных упругих постоянных. При углах равных и более 3.5 градусов значения скоростей определяются по стандартным формулам. Таки образом, видно, что в растворе углов отклонения волнового вектора акустических волн от оси [100] на ± 4 градуса наблюдается аномалия ориентационной зависимости коэффициента затухания, как и для скорости распространения этих волн. Указанное отклонение необходимо учитывать при разработке устройств с применением кристаллов парателлуриата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «Закономерности анизотропии упругих свойств в пьезоэлектрических кристаллах германата и силиката висмута и парателлуриата» можно сделать следующие выводы.

1. Определены все независимые действительные и мнимые компоненты комплексного тензора упругости в кристаллах силиката и германата висмута и парателлуриата и на их основе построены характеристические поверхности скорости и затухания акустических волн в этих кристаллах.
2. Для описания закономерностей анизотропии затухания акустических волн введен мнимый параметр акустической анизотропии, который правильно предсказывает закономерность анизотропии коэффициента затухания в зависимости от кристаллографической ориентации в кубических кристаллах германата и силиката висмута.
3. Показано, что в кристаллах германата висмута, силиката висмута и парателлуриата диэлектрические потери увеличивают коэффициент затухания пьезоактивных акустических волн, однако не влияют на общий характер анизотропии скорости и затухания этих волн.
4. Установлено, что большое различие действительного и мнимого параметров акустической анизотропии в кристаллах германата висмута

обуславливается влиянием диэлектрических потерь на коэффициент затухания акустических волн.

5. Проведен расчет характеристик акустических волн в кристаллах парателлурита приближенными методами, который позволяет выявить правильную закономерность изменения скорости и затухания акустических волн при малых отклонениях направления их распространения от осей второго порядка.
6. Показано, что в кристаллах германата и силиката висмута чем больше мнимый параметр акустической анизотропии отклоняется от единицы, тем больше коэффициент затухания акустических волн зависит от кристаллографической ориентации.

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

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

SAIDVALIEV ULUGBEK ALIMJANOVICH

**REGULARITIES OF ANISOTROPY OF ELASTIC PROPERTIES OF
BISMUTH SILICATE, BISMUTH GERMANATE AND PARATELLURITE
CRYSTALS**

01.04.07 – Condensed matter physics

**DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences**

Tashkent – 2023

The topic of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan under No.B2021.2.PhD/FM242.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics 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:

Axmedjanov Farxod Rashidovich
doctor of physical and mathematical sciences,
senior researcher

Official opponents:

Bakhramov Sagdulla Abdullayevich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor, Academic

Mukhtorov Adil Pozilovich
Doctor of Philosophy (PhD) in Physics and Mathematics,
senior researcher

Leading organization:

**Tashkent State Technical University named
after Islam Karimov**

The defense of the dissertation will be held on "___" _____ 2023, at ___ at the meeting of the 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 at the Information Resource Centre of the 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 "___" _____ 2023.
(Registry record No. ___ dated "___" _____ 2023.)

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

O.R. Tojiboev
Scientific secretary of the Scientific Council onaward
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 (PhD thesis annotation)

The aim of the research is to identify regularities of the influence of crystallographic orientation on the elastic properties of paratellurite and bismuth silicate and bismuth germanate crystals.

The tasks of the research:

experimentally determine the values of the velocity and attenuation of acoustic waves along the symmetry axes in crystals of paratellurite, bismuth silicate and bismuth germanate in the hypersonic frequency range;

to establish the mechanisms of attenuation of high-frequency acoustic waves in crystals of paratellurite, bismuth silicate and bismuth germanate;

to determine the mechanism of influence of dielectric losses on the magnitude of the attenuation coefficient of piezo active acoustic waves in crystals;

to identify the patterns of changes in the velocity and attenuation of acoustic waves with small deviations in the direction of their propagation from the axes of symmetry in paratellurite crystals;

by analogy with the parameter of anisotropy from the actual elastic constants, enter and determine the parameter of anisotropy from the imaginary elastic constant in cubic crystals of bismuth silicate and bismuth germanate.

The object of the research is the anisotropy of velocity and that of attenuation coefficient of acoustic waves in crystals of bismuth silicate, bismuth germanate and paratellurite.

The subject of the research is the propagation rate and attenuation coefficient of high-frequency acoustic waves in crystals of paratellurite, bismuth silicate and bismuth germanate. Crystals are chosen according to their technical importance and the possibility of improving devices based on them by optimizing the crystallographic orientation.

The scientific novelty of the research is presented in the following:

for the first time all independent real and imaginary component of complex elasticity tensor in noncentrosymmetric crystals of bismuth silicate and bismuth germanate and paratellurite were determined;

an imaginary parameter of acoustic anisotropy was introduced, which allows to predict the degree of anisotropy of attenuation factor of acoustic waves depending on crystallographic orientation in cubic crystals;

it is presented that in piezoelectric crystals dielectric losses strengthen the degree of anisotropy of attenuation factor for acoustic waves without affecting its form;

a regularity of anisotropy of velocity and attenuation factor of acoustic waves was obtained for the directions along and close to the 2nd order of symmetry axis in paratellurite crystals.

Implementation of the results of the research. Based on the results obtained from the research on anisotropy of elastic properties of bismuth silicate and bismuth germanate and paratellurite crystals:

independent real and imaginary components of the complex elastic tensor in cubic noncentrosymmetric crystals of bismuth silicate and germanate were used in the framework of the project of Namosys Ltd. (Israel) No. NGA1556789 "Optimization of signal processing in combination with a photodiode array for optical spectrum analysis" (2019-2021) (letter from Namosys Ltd. (Israel) dated June 12, 2022). The application of the results allowed to improve the accuracy of optical signal processing and reduce signal loss to the level of 30dB;

factor of acoustic anisotropy by imaginary elastic constants for bismuth silicate and germanate crystals was used by foreign researchers (from reference in international scientific journals: Applied Surface Science 2022, Vol. 575, 151732; Nanomaterials 2022, 12(22), 4101; Sensors & Transducers. 2021, Vol. 254, Issue 7, p.38-42). Using the results made it possible to obtain a highly efficient photocatalytic nanomaterial based on bismuth silicate and explain the elastic properties of lanthanum gallosilicate crystals;

the importance of considering the contribution of dielectric losses to acoustic attenuation in non-centrosymmetric bismuth silicate and bismuth germanate crystals and paratellurite crystals has been used by foreign researchers (references in international journals: Applied Surface Science 2022, Vol. 575, 151732; Nanomaterials 2022, 12(22), 4101; Sensors & Transducers. 2021, Vol. 254, Issue 7, p.38-42). The use of the results made it possible to increase the efficiency of calculations for obtaining high-quality photocatalytic nanomaterials based on bismuth silicate, as well as for explaining the properties of lanthanum gallosilicate crystals.

Dissertation volume and structure. The PhD dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, appendix and a bibliography. The total volume of the dissertation is 105 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Akhmedzhanov F.R., Mirzaev S.Z. Saidvaliev U.A. Singularities of anisotropy of acoustic attenuation in paratellurite crystals // Proceedings of Meetings on Acoustics. – USA: Acoustical Society of America, 2018. – Vol. 34. – id. 045045, S14-2. – pp. 1-6. (№3. Scopus; IF=0.31).
2. Akhmedzhanov F.R., Saidvaliev U.A., Kurbanov J.O. Anisotropy of attenuation of acoustic waves in photorefractive BSO and BGO crystals // Uzbek Journal of Physics. - Tashkent: Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 2018. – Vol. 20. – No.4. – pp. 232-235.
3. Ахмеджанов Ф.Р., Саидвалиев У.А., Курталиев Э.Н. Анизотропия скорости и затухания акустических волн в кристаллах парателлурифта вблизи осей симметрии // Научный вестник СамГУ. – Самарканд: Самаркандский государственный университет, 2018. – № 3. – С. 58-62.
4. Akhmedzhanov F., Mirzaev S., Saidvaliev U. Attenuation Mechanisms of High-Frequency Acoustic Waves in Piezoelectric Cubic Crystals // Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, September 3-9, 2019. – Aachen (Germany), 2019. – p. 8212-8217. (№3. Scopus).
5. Ахмеджанов Ф.Р., Саидвалиев У.А., Тухтаев У.У., Назаров Ж.Т. Параметр упругой анизотропии в кристаллах силиката висмута // Научный вестник СамГУ. – Самарканд: Самаркандский государственный университет, 2019. – № 1. – С. 77-82.
6. Akhmedzhanov F.R., Mirzaev S.Z., Saidvaliev U.A. Parameters of elastic anisotropy in bismuth silicate crystals // Ferroelectrics. – Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 2020. – No. 556(1). – pp. 23-28. (№3. Scopus; IF=0,686)

II бўлим (II часть; part II)

7. Akhmedzhanov F.R., Saidvaliev U.A. Surfaces of attenuation of acoustic waves in cubic crystals. – Acta Crystallographica. Section A: Foundations of crystallography. – USA: John Wiley and Sons Inc., 2010. – Vol.66(a1). – id. s118-. (№3. Scopus; IF=1,662)
8. Akhmedzhanov F.R., Saidvaliev U.A. Acousto-optic investigation of acoustic anisotropy in paratellurite crystals // Journal of the Acoustical Society of America. – USA: Acoustical Society of America, 2015. – Vol.138(3). – pp. 1806-1809. (№3. Scopus; IF=2,365)
9. Akhmedzhanov F.R., Saidvaliev U.A. Analysis of attenuation of high-frequency acoustic waves in piezoelectric crystals // Proceedings of 20th

International Congress on Acoustics, 23-27 August 2010. – Sydney (Australia), 2010. – p. 414.

10. Akhmedzhanov F.R. Saidvaliev U.A. Influence of dielectric losses on attenuation of acoustic waves in piezoelectric crystals. // 21st International Symposium on the Applications of Ferroelectrics & 11th European Conference on Applications of Polar Dielectrics, 9-13 July 2012. – Aveiro (Portugal), 2012. – p. 117.

11. Akhmedzhanov F.R. Saidvaliev U.A. Attenuation of High-frequency Acoustic Waves in Paratellurite Crystals // Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, European Conference on Application of Polar Dielectrics, and Piezoelectric Force Microscopy Workshop, August 21-25, 2016. – Darmstadt (Germany), 2016. – p. 14.

12. Akhmedzhanov F.R. Saidvaliev U.A. Attenuation Anisotropy in Paratellurite Crystals // Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред: V Международная конференция, 22-24 сентября 2016. – Самарканд, 2016. – С. 128.

13. Ахмеджанов Ф.Р., Саидвалиев У.А. Анизотропия затухания акустических волн в фоторефрактивных кристаллах BSO и BGO // Седьмая Международная конференция по Физической электронике IPEC-7: Сборник тезисов докладов, 18-19 мая 2018. – Ташкент, 2018. – С. 111.

14. Akhmedzhanov F.R., Mirzaev S.Z., Saidvaliev U.A. Singularities of anisotropy of acoustic attenuation in paratellurite crystals // 21st International Symposium on Nonlinear Acoustics, July 9-13, 2018. – Santa Fe (New Mexico), 2018. – S14-2. – p. 67.

15. Ахмеджанов Ф.Р., Саидвалиев У.А. К расчету скорости акустических волн в кристаллах парателлурита вблизи осей симметрии // «Современные проблемы физики»: Материалы VI Международной конференции, 28-30 июня 2018. – Душанбе, 2018. – С 251-254.

16. Akhmedzhanov F.R., Mirzaev S.Z., Saidvaliev U.A. Parameters of Elastic Anisotropy in Bismuth Silicate Crystals // Joint Conference of the IEEE ISAF, EMF, ICE, IWPM and PFM, July 14-19, 2019. – Lausanne (Switzerland), 2019. – p. 576.

Ilmiy rahbar

F.R. Axmedjanov

Talabgor

U.A.Saidvaliyev

Avtoreferat “O’zMU xabarlari” ilmiy jurnali tahririyatida tahrirdan o’tkazilib, o‘zbek va rus tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi (31.05.2023 yil).