

**ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI

ELBOYEVA MOXINUR IMOMNAZAR QIZI

**PbMoO₄, CaMoO₄, Bi₁₂GeO₂₀ VA Bi₁₂SiO₂₀ KRISTALLARIDA
AKUSTOOPTIK XOSSALARNING ANIZOTROPIYA
QONUNIYATLARI**

01.04.03- Molekulyar fizika va issiqlik fizikasi

**FIZIKA — MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

**Fizika - matematika fanlari bo'yicha falsafa (PhD) doktori
dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**
**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
физико – математическим наукам**
**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on Physics and
mathematics sciences**

Elboyeva Moxinur Imomnazar qizi

PbMoO₄, CaMoO₄, Bi₁₂GeO₂₀ va Bi₁₂SiO₂₀ kristallarida akustooptik
xossalarning anizotropiya qonuniyatlari..... 5

Элбоева Мохинур Имомназар кизи

Закономерности анизотропии акустооптических свойств
кристаллов PbMoO₄, CaMoO₄, Bi₁₂GeO₂₀ и Bi₁₂SiO₂₀..... 23

Elboeva Mokhinur Imomnazar kizi

Regularities of anisotropy of acousto-optical properties of PbMoO₄,
CaMoO₄, Bi₁₂GeO₂₀ and Bi₁₂SiO₂₀ crystals..... 43

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 45

**ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI

ELBOYEVA MOXINUR IMOMNAZAR QIZI

**PbMoO₄, CaMoO₄, Bi₁₂GeO₂₀ VA Bi₁₂SiO₂₀ KRISTALLARIDA
AKUSTOOPTIK XOSSALARNING ANIZOTROPIYA
QONUNIYATLARI**

01.04.03- Molekulyar fizika va issiqlik fizikasi

**FIZIKA — MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.1.PhD/FM1121 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zR FA Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida bajarilgan.

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

Ilmiy rahbar:

Axmedjanov Farxad Rashidovich

fizika - matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Baxramov Sagdulla Abdullaevich

fizika - matematika fanlari doktori, akademik

Qodirov Mo'min Qodirovich

fizika - matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

O'zR FA Materialshunoslik instituti

Dissertatsiya himoyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil «14» oktyabr soat 14:30 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100125, Toshkent shahri, Do'rmon yo'li ko'chasi, 33-uy. Tel./faks: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz, Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (15 raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100125, Toshkent shahri, Do'rmon yo'li ko'chasi, 33-uy. Tel./faks: (+99871) 262-31-69.

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil «2» oktyabr kuni tarqatildi.

(2025 yil «2» oktyabr dagi 15 raqamli reyestr bayonnomasi).



X.B. Ashurov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi,
t.f.d., professor

I.D. Yadgarov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy
kotibi, f-m.f.d., professor

U.K. Maxmanov

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Hozirgi vaqtda dunyoda qo‘rg‘oshin molibdati, kalsiy molibdati, vismut germanati va vismut silikati kristallari texnologiyada turli akustik va akustooptik qurilmalarda ishchi muhit sifatida keng qo‘llaniladi. Ushbu monokristallarning barchasi keng shaffoflik diapazoniga (0,35 - 6,0 mkm) va yetarlicha yuqori ikkilanma nur sindirshga xossasiga ega. Bu ularni akustik va akustooptik kechikish liniyalarida, akustooptik elektron sozlanish filtrlarida va boshqaruv konvertorlarida faol ishchi muhit sifatida ishlatishga imkon beradi. Shu bilan birga, bu kristallarning akustooptik xossalarning anizotropiyasi haligacha batafsil o‘rganilmagan.

Kristallarning ishchi kesimlari, qoida tariqasida, ikkinchi va undan yuqori tartibli simmetriya o‘qlariga perpendikulyar kesimlardir. Masalan, qo‘rg‘oshin molibdati kristallarida [001] o‘qi bo‘ylab (to‘rtinchi tartibli o‘qqa perpendikulyar yo‘nalish) tarqaladigan ko‘ndalang akustik to‘lqin anizotropik akustooptik o‘zaro ta‘sirga ega qurilmalar uchun zarur bo‘lgan katta akustooptik sifat ko‘rsatkichiga mos keladi. Kristallarning fotoelastik xossalarning anizotropiyasini o‘rganish noxizizli akustikaning ko‘plab muammolarini hal etishda muhim hisoblanadi. Bunday tadqiqotlar yangi avlod akustooptik qurilmalarini ishlab chiqishda zarur bo‘lgan ushbu kristallarning eng samarali kesimlarini aniqlash uchun muhimdir. Umuman olganda, bunday kristallardagi akustooptik xossalarning anizotropiyasi qonuniyatlari haqida fundamental bilimlarni olish shubhasiz, molekulyar fizika va issiqlik fizikasining dolzarb vazifasidir.

So‘nggi yillarda O‘zbekiston Respublikasida materialshunoslik sohasidagi fundamental tadqiqotlarga – yangi materiallarni izlash va ma‘lum bo‘lgan materiallarning xossalarni, jumladan, kristallarning akustik va akustooptik xossalarni o‘rganishga mamlakat iqtisodiyotining turli tarmoqlarida katta e‘tibor qaratilmoqda. Shu jumladan, O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, Fizika-texnika instituti, Yadro fizikasi va Materialshunoslik institutlarida, Mirzo Ulug‘bek nomidagi O‘zbekiston Milliy universitetida, Samarqand davlat universiteti va respublikaning boshqa ilmiy-tadqiqot institutlari va oliy o‘quv yurtlarida bunday tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu fundamental va amaliy tadqiqotlar yo‘nalishlari O‘zbekistonda ilm-fan va yuqori texnologiyali ishlab chiqarishni rivojlantirishda muhim ahamiyatga ega bo‘lib, Prezident farmon va qarorlarida belgilab berilgan 2022–2026-yillarda yangi O‘zbekistonni rivojlantirish bo‘yicha strategiyada¹ o‘z ifodasini topgan Mazkur dissertatsiya ishida olib borilgan izlanishlar O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining “2022–2026-yillarda Yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to‘g‘risida”gi (2022-yil 28-yanvardagi PF-60. PQ-3012-son). farmon va qarorlarida belgilangan vazifalarga ma‘lum darajada mos keladi.

Xuddi shunday vazifalar O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 17-fevraldagi “Fanlar akademiyasi faoliyatini, ilmiy-tadqiqot faoliyatini tashkil etish,

¹2022 yil 28-yanvardagi PF-60-son “2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risidagi” O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni.

boshqarish va moliyalashtirishni yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-2789-son qarorida hamda ushbu yo‘nalishda qabul qilingan boshqa me‘yoriy hujjatlarda ham nazarda tutilgan.

Tadqiqotning Respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining asosiy ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalarni rivojlantirishning PFI-2 – “Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik” yo‘nalishlariga muvofiq bajarilgan. Dissertatsiya mavzusi 2018-2024 yillarga mo‘ljallangan fundamental va amaliy tadqiqotlar davlat ilmiy-texnik dasturlari bilan chambarchas bog‘liq.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Dunyoning yetakchi olimlarining bir qator eksperimental va nazariy ishlari turli simmetriyali kristallarning akustooptik xususiyatlarini o‘rganishga bag‘ishlangan. Shuni ta’kidlash kerakki, olimlar J. Taker, V. Rampton G.A. Coquin, D.A. Pinnov, R.V. Dikson va M.G. Koen, (AQSh), E. Delesan va D. Royer (Fransiya), shuningdek, Britaniya olimi R.Nyunxem turli kristallarda, jumladan, tantalat va niobat litiy, qo‘rg‘oshin molibdati va vismut silikati kristallarida akustik va optik to‘lqinlarning keng chastotadagi o‘zaro ta’sirini o‘rgangan Rossiyalik olimlar V.I. Balakshiy, V.B. Voloshinov, Y.V. Gulyaev, V.V.Lemanov, V.V. Proklovlarning nazariy va eksperimental ishlarida tovush orqali yorug‘lik difraksiyasining ba’zi geometriyalari uchun turli simmetriyadagi kristallarning asosiy akustooptik xossalarini, shu jumladan fotoelastik konstantalarni o‘rgandi, vismut silikati va vismut germanati kristallarining bir qator akustooptik xossalarini Belarus olimlari (V.N. Bely., G.V.Kulak va boshqalar) va Ukraina olimlari (B.G. Mytsyk, A. Erba, N.M. Demyanishin) o‘rgandilar.

O‘zbekistonlik olimlar P.K. Habibullaev, S.Z. Mirzaev, Z.T. Azamatov, L.M. Sobirov, F.R. Axmedjanov, D.I. Semenov va boshqalar fizik akustika sohasidagi tadqiqotlarni rivojlantirishga katta hissa qo‘shdilar. Ular bir qator dielektrik va suyuq kristallar va binar eritmalarning akustik va akustooptik xossalarini ultratovush usullari va Bragg yorug‘lik difraksiyasi va Mandelshtam-Brilyuen sochilishi usullaridan foydalangan holda o‘rgandilar.

Shuningdek, qo‘rg‘oshin molibdati, kalsiy molibdati, vismut germanati va vismut silikati kristallarida akustooptik xossalarning anizotropiyasi batafsil o‘rganilmagan. Ushbu kristallarning akustooptik xossalarining anizotropiyasini bilish ularni akustooptik axborotni qayta ishlash qurilmalarida faol muhit sifatida ishlab chiqish va ishlatishda zarurdir.

Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutining “Ko‘p fazali tizimlar issiqlik fizikasi” laboratoriyasida 2021-2024 yillarga mo‘ljallangan “Dielektrik va segnetoelektrik kristallarida elastik, fotoelastik va superior xossalarining noxiziqli hodisalari, fazaviy o‘tishlari va anizotropiyasi” mavzusidagi ilmiy-tadqiqot dasturi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi qo‘rg‘oshin molibdati, kalsiy molibdati, vismut germanati va vismut silikati kristallarida akustooptik xossalarning anizotropiyasini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

qo'rg'oshin va kalsiy molibdati hamda vismut germanati va silikati kristallarida barcha mustaqil elastik va fotoelastik konstantalar qiymatlarini yorug'likning akustik to'liqlarda Bragg difraksiyasi yordamida aniqlash;

qo'rg'oshin va kalsiy molibdati hamda vismut germanati va silikat kristallarida akustik to'liq tezligi va effektiv fotoelastik konstantalarning anizotropiyasini amaliy qo'llanilishi nuqtayi nazaridan eng muhim bo'lgan kristallografik tekisliklar uchun piezoelektrik effektning ta'sirini hisobga olgan holda tadqiq qilish;

tadqiqot kristallarida akustooptik sifat koeffitsiyentining yo'nalishga bog'liqligini aniqlash imkonini beruvchi effektiv fotoelastik konstantalar uchun ifodalarni hosil qilish;

PbMoO₄ kristallarida neodim qo'shimchasining akustooptik sifat koeffitsiyenti qiymati va anizotropiyasiga ta'sirini baholash;

vismut germanati va silikati kristallarida optik faollik hamda piezo va elektrooptik effektlarning akustooptik sifat koeffitsiyenti qiymati va anizotropiyasiga ta'sirini baholash.

Tadqiqotning obyekti sifatida qo'rg'oshin va kalsiy molibdati, vismut germanati va silikati kristallari olingan.

Tadqiqot predmeti bo'lib qo'rg'oshin molibdati, kalsiy molibdati, vismut germanati va vismut silikati kristallarining effektiv elastik va fotoelastik parametrlari hamda akustooptik sifat koeffitsiyentlarini to'liq vektoriga nisbatan o'zgarishi hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqotni olib borishda kristallarning monokristalligini va kristall strukturaviy xususiyatlarini, o'lchamlarini aniqlash, deformatsiyalarni baholash va struktura haqida chuqur ma'lumot olish maqsadida rentgen diffraksiya (XRD) va Raman spektroskopiya analiz tekshiruvlari o'tkazildi. Kristallarda akustik to'liq tezligini aniqlash uchun akustooptik usul va materiallarning effektiv fotoelastik doimiylarini aniqlash uchun modifikatsiyalangan Dikson-Koen usuli qo'llanildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk bor qo'rg'oshin molibdati va kalsiy molibdati kristallarida (100) va (001) tekisliklarda tarqaluvchi akustik to'liqlar uchun effektiv elastik konstantalarning anizotropiyasi aniqlanib, ularning ushbu kristallarda akustooptik sifat koeffitsiyenti o'zgarishiga ta'siri o'rganildi;

kalsiy molibdati kristallarida sof ko'ndalang akustik to'liqlar bo'ylama normal yo'nalishlarda yorug'lik difraksiyasida akustooptik sifat koeffitsiyenti M_2 ning maksimal qiymati ($12 \cdot 10^{-15} \text{s}^3/\text{kg}$) bo'ylama to'liqlardagi ($2 \cdot 10^{-15} \text{s}^3/\text{kg}$) difraksiyaga nisbatan 6 marta kattaligi aniqlanib, bu qiymat PbMoO₄ va TeO₂ kabi yuqori akustooptik sifatga ega kristallarning qiymati bilan taqqoslanishi mumkinligi ko'rsatildi;

ilk bor vismut germanati va vismut silikati kristallarida piezo- va elektrooptik effektlar hamda optik faollik hissasini hisobga olgan holda effektiv fotoelastik konstantalar va akustooptik sifat koeffitsiyentini aniqlash uchun tenglamalar olindi;

qo'rg'oshin molibdati kristallarida neodim qo'shimchasi mavjud bo'lganda effektiv fotoelastik konstantaning 1,5 martaga kamayishi kuzatilib, bu PbMoO₄

kristall panjarasida neodim ionlarining yuqori harakatchanligi akustik to‘lqin va yorug‘lik o‘zaro ta‘sirida fotoelastik effektini qisman kamaytirishi bilan izohlandi;

vismut germanati va vismut silikati kristallarida piezo- va elektrooptik effektlar hamda optik faollikni inobatga olish natijasida akustooptik sifat koeffitsiyenti M_2 ning maksimal qiymatlari kuzatiladigan yo‘nalishlar aniqlanib, ular [110] o‘qiga nisbatan perpendikulyar qutblanish uchun 20^0 va parallel qutblanish uchun 160^0 burchaklarda joylashishi aniqlandi.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

qo‘rg‘oshin va kalsiy molibdati, vismut germanati va silikati kristallarining fotoelastik konstantalarining olingan qiymatlari ushbu kristallardagi akustooptik sifat koeffitsiyentining maksimal yo‘nalishlarini aniqlashga, bo‘ylama va ko‘ndalang akustik to‘lqinlarda Bragg yorug‘lik diffraksiyasining samaradorligini oshirishga imkon beradi. Tadqiq etilgan kristallarda akustooptik sifat koeffitsiyentining o‘zgarishida topilgan qonuniyatlardan optimal geometriyani tanlash orqali akustooptik qurilmalarda diffraksiyalangan yorug‘lik intensivligini oshirish imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi kristallardagi akustik to‘lqinlar bilan optik to‘lqinlarning o‘zaro ta‘sirini o‘rganish uchun akustik va akustooptik usullarni qo‘llash, ko‘plab eksperimental natijalar va ularning kondensirlangan holatlar fizikasining asosiy qonunlari va tamoyillariga muvofiqligi hamda olingan natijalar boshqa mualliflarning eksperimental ma‘lumotlari bilan uyg‘unligi bilan ta‘minlangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki, kalsiy molibdat kristallarida sof ko‘ndalang akustik to‘lqinlarda yorug‘lik diffraksiyasi sodir bo‘lganda, akustooptik sifat koeffitsiyenti M_2 ning qiymati bo‘ylama akustik to‘lqinlarda kuzatiladigan qiymatga nisbatan bir tartib yuqori ekanligi ilk bor isbotlandi. Shuningdek, vismut germanati va silikati kristallarida akustik to‘lqinlarning tarqalish yo‘nalishiga bog‘liq holda akustooptik sifat koeffitsiyentining o‘zgarish qonuniyati ilk bor aniqlandi. Ushbu tahlilda piezo- va elektrooptik effektlarning umumiy hissasi hisobga olinib, ularning akustooptik o‘zaro ta‘sirga ta‘siri baholandi.

Ushbu dissertatsiya ishidagi tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, qo‘rg‘oshin molibdati va kalsiy molibdati kristallarida akustooptik sifat koeffitsiyenti hamda effektiv fotoelastik konstantalarning akustik to‘lqinlarning tarqalish yo‘nalishiga bog‘liq holda o‘zgarish qonuniyatlari o‘rganildi. Ushbu natijalar asosida mazkur kristallarning akustooptik qurilmalarda, jumladan, yuqori samarali optik filtrlar, modulyatorlar va deflektorlarda qo‘llanilish doirasi kengaymoqda. Bundan tashqari, tadqiq qilingan kristallarning fotoelastiklik tenzori komponentlari uchun aniqlangan qiymatlar ushbu materiallar asosida ishlab chiqiladigan zamonaviy akustooptik qurilmalar konstruksiyasini optimallashtirishda fundamental ma‘lumotlar bazasi sifatida foydalanish imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Qo‘rg‘oshin molibdati, kalsiy molibdati, vismut germanati va vismut silikati kristallarida akustooptik xossalarning anizotropiya qonuniyatlari bo‘yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

Mirzo Ulug‘bek nomidagi O‘zbekiston Milliy universiteti fizika fakultetining Fotonika kafedrasida amalga oshirilgan “Metall oksidlari bilan legirlangan silikatlarining termoelektrik xossalari va o‘z-o‘zidan tashkil bo‘lish jarayonlari” mavzusidagi UZB-Ind-2021-78 amaliy loyihasini amalga oshirishda piezo va elektrooptik effektlarning ulushi hamda vismut silikati kristallaridagi fotoelastiklik tenzorining komponentlaridan foydalanilgan. (O‘zbekiston Milliy universiteti 12.03.2025 y. 01/11 – 3541-sonli xat). Natijalardan foydalanish legirlangan silikatlarining optik va piezoelektrik xossalari mexanik ta’sir ostida qanday o‘zgarishini tushuntirish imkonini bergan;

qo‘rg‘oshin molibdati kristallaridagi akustooptik o‘zaro ta’sirning anizotropiyasini o‘rganish natijasida olingan dissertatsiya ishi natijalarining nazariy qismidan Vuhan universiteti Texnologik fanlar institutining Fundamental tadqiqot jamg‘armasi tomonidan qo‘llab-quvvatlangan № 413100036 loyiha doirasida foydalanilgan (Xitoy, Vuhan universiteti, Vuhan shahri, 2024 yil 18 noyabrdagi xat). Natijalar tetragonal va kubik singoniyali kristallarda samarali kesimlarni topish va akustik to‘lqinlar ta’sirida Bragg difraksiyasini tavsiflash imkonini bergan;

“Ultrasonics” jurnalidagi nashr etilgan natijalarimiz xorijiy tadqiqotchilar tomonidan ilmiy tadqiqotlarida (Optical Materials 2024, Vol. 148, 114880; Optical Materials 2024, Vol. 157, part 2, 116320; RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies 2024, Vol.16, No.7, p. 837-846.) akustooptik o‘zaro ta’sir asosida Ammoniy floroberilat kristallarida piezooptik va elastooptik ta’sirlarni, Rb_2SO_4 kristallarining piezo-optik xususiyatlarini, kremniyning to‘lqin o‘tkazgich mikrotuzilmalariga akustik ta’sirlarni hisoblash kabi tadqiqot ishlarida natijalarini tushuntirish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya bo‘yicha olingan asosiy natijalar 6 ta xalqaro va 8 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarda ma’ruza qilinib, muhokamadan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 23 ta ilmiy ish chop etilgan, bulardan O‘zbekiston Respublikasi Oliy Attestatsiya komissiyasining falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy nashrlarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 9 ta, shu jumladan 2 ta ilmiy maqola Scopus ma’lumotlar bazasida indekslangan jurnallarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish qismi, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 112 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi yoritilib, tadqiqotning O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining asosiy ustuvor yo‘nalishlari bilan bog‘liqligi hamda muammoning o‘rganilganlik darajasi yoritilgan. Tadqiqotning maqsad va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqotning ob'ekti, predmeti va usullari, tadqiqotning ilmiy yangiligi ko‘rsatilgan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, natijalarni amalga

oshirish va ishning sinovdan o'tkazilishi, shuningdek, dissertatsiya hajmi va tuzilishi haqida ma'lumot berilgan.

Dissertatsiyaning "**PbMoO₄, CaMoO₄, Bi₁₂GeO₂₀, Bi₁₂SiO₂₀ kristallarining akustik va akustooptik xossalariга oid nazariy va eksperimental tadqiqotlar**" deb nomlangan birinchi bobida akustik to'liqlarning kristallarda tarqalishi va ularning optik to'liqlar bilan o'zaro ta'siri haqida asosiy nazariy va eksperimental tadqiqotlar to'g'risida ma'lumotlar berilgan.

Bobning birinchi qismida uchta akustik to'liqlarning faza tezligining fazoviy dispersiyasini va ularning qutblanishini aniqlaydigan Grin-Kristoffel tenglamalari muhokama qilinadi. Piezoelektrik kristallarda piezoelektrik effekt akustik to'liqlarning tarqalish tezligini oshirishi ko'rsatilgan. Sof bo'ylama va sof ko'ndalang to'liqlar tarqaladigan yo'nalishlarni topish uchun umumiy usul ko'rsatilgan. Umumiy holatda akustik to'liqdagi energiya oqimining yo'nalishi uning tarqalish yo'nalishiga to'g'ri kelmasligi ko'rsatilgan.

Ikkinchi qismida akustik to'liqlar ta'sirida yorug'lik difraksiyasi nazariyasining asosiy tamoyillari keltirilgan, Raman-Nath va Bragg rejimlarida difraksiya shartlari va xususiyatlari ko'rib chiqiladi. Anizotrop muhit uchun Pockels nazariyasi o'rniga fotoelastik effektning umumlashirilgan nazariyasidan foydalanish zarurligi ko'rsatilgan. Unga ko'ra fotoelastik konstantalarga qo'shimcha hissalarini asosiy qism bilan solishtirish mumkin.

Uchinchi qismida yorug'likning akustik to'liqlardagi Bragg difraksiyasi nazariyasining asosiy qoidalari keltirilgan va uning xususiyatlari ko'rsatilgan. Bragg yorug'lik difraksiyasining samaradorligini tavsiflovchi parametr Dikson tomonidan kiritilgan M₂ akustooptik sifat koeffitsiyenti bo'lib, u quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$M_2 = \frac{n^6 p_{\text{eff}}^2}{\rho V^3} \quad (1)$$

To'rtinchi qismida qo'rg'oshin molibdati, kalsiy molibdati, vismut germanati va vismut silikati, kristallari bo'yicha nashr etilgan eksperimental ishlar ko'rib chiqiladi. ularda akustooptik xossalarga oid ko'plab nashrlar bo'lishiga qaramay, bu xossalarning anizotropiyasi amalda o'rganilmagan.

"PbMoO₄, CaMoO₄, Bi₁₂GeO₂₀ va Bi₁₂SiO₂₀ kristallarning akustooptik, strukturaviy xususiyatlari tadqiqi usullari va qurilmalari" deb nomlangan ikkinchi bobda qo'rg'oshin molibdati, kalsiy molibdati va vismut germanati, vismut silikati, kristallarining elastik va fotoelastik xossalari o'rganish uchun foydalanilgan usullar va o'lchash moslamalari muhokama qilingan.

Bobning birinchi qismida kristallarni o'rganishning akustooptik usullari va ularning turli chastota diapazonlarida qo'llanilishi muhokama qilinadi. Raman-Nath va Bragg rejimlarida yorug'lik difraksiyasining shartlari va xususiyatlari keltirilgan.

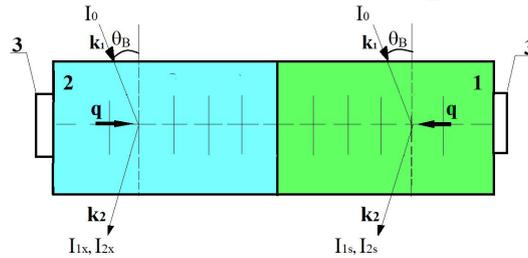
Ikkinchi qismida Bragg yorug'lik difraksiyasi va akustooptik o'lchash tizimiga asoslangan akustooptik tadqiqot usuli muhokama qilinadi. v chastotali akustik to'liqlarning tarqalish tezligi quyidagi munosabat orqali aniqlanadi:

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

bu yerda θ_B - goniometr yordamida o'lchanadigan, namuna qo'yilgan aylanish bosqichida o'lchanadigan Bragg yorug'lik difraksiyasining tashqi burchagi.

Uchinchi qismda akustik to'lqin piezoelektrik transduserlar tomonidan navbatma-navbat qo'zg'atilganda, avval standart tomondan, so'ngra sinov namunasi tomonidan o'zgartirilgan Dikson-Koen usuli yordamida effektiv fotoelastik konstantalarni aniqlash tavsiflanadi. Standart sifatida kvarts namunasi ishlatilgan.

Tadqiqotning metod sxemasi 1-rasmda ko'rsatilgan.



1-rasm. o'zgartirilgan Dikson-Koen usuli yordamida effektiv fotoelastik konstantalarni aniqlash sxemasi

1-rasmda quyidagi belgilar qo'llaniladi: 1 – etalon, 2 - o'rganilayotgan namuna, 3 - piezoelektrik o'zgartirgich, q - akustik to'lqinning to'lqin vektori, k_1 va k_2 - mos ravishda tushgan va difraksiyalangan yorug'lik to'lqin vektorlari, I_0 - tushgan yorug'likning intensivligi. Dastlab standart tomondan akustik to'lqin qo'zg'atiladi va standart I_{1s} va I_{1x} namunada difraksiyalangan yorug'lik intensivligi o'lchanadi. Keyin akustik to'lqin namuna tomondan qo'zg'atiladi va I_{2x} namunadagi va I_{2s} standartdagi yorug'lik intensivligi o'lchanadi. Effektiv fotoelastik konstantalar quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\left[\frac{p_{eff}^2 n^6}{\rho V^3} \frac{n^2}{(n+1)^4} \right]_X = \left[\frac{p_{eff}^2 n^6}{\rho V^3} \frac{n^2}{(n+1)^4} \right]_S \left(\frac{I_{1x} I_{2x}}{I_{1s} I_{2s}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

bu yerda ρ - kristallning zichligi; n – nur sindirish ko'rsatkichi. (3) ifodada "s" va "x" belgilari mos ravishda etalon va sinov namunalarining xususiyatlarini ko'rsatadi. effektiv fotoelastik konstantani aniqlashning xatoligi taxminan 20% ni tashkil etdi.

Ikkinchi bobning to'rtinchi qismida tadqiqot namunalarining umumiy xarakteristikalar va eksperimental metodologiya ko'rib chiqiladi. Parallelepiped ko'rinishidagi namunalar uzun tomonlari bilan [100], [001] va [110] kristallofizik yo'nalishlar bo'yicha 1 daraja aniqlikda va o'lchamlari 1-2 sm oraliqda. Namunalardagi bo'ylama va ko'ndalang akustik to'lqinlar 30 dan 50 MHzgacha bo'lgan chastotali, mos ravishda X va Y-kesimli piezoelektrik kvarts transduserlari tomonidan qo'zg'atilgan.

"Qo'rg'oshin molibdati va kalsiy molibdati kristallarining akustooptik xossalari anizotropiyasi" nomli uchinchi bobning birinchi bo'limida qo'rg'oshin molibdati, kalsiy molibdati, vismut silikati va vismut germanati namunalarida rentgenostrukturaliy tahlil hamda Raman spektroskopiyasi usullari yordamida tekshiruv o'tkazilgan. Ushbu tadqiqot ularning kristall panjarasi

parametrlari va aralashmalar yoʻqligini aniqlash maqsadida amalga oshirilgan. Olingan natijalar kristallarning yuqori sifatga ega ekanligini va fazaviy sofliqini tasdiqlagan.

Ikkinchi boʻlimda qoʻrgʻoshin molibdati kristallarining elastik va fotoelastik xossalari anizotropiyasini oʻlchash natijalari keltirilgan. Akustik toʻlqinlar tezligi va yorugʻlik difraksiyasi munosabatining turli geometriyalari uchun difraksiyalangan yorugʻlik intensivligi (3) dan qoʻrgʻoshin molibdati kristallarida effektiv fotoelastik konstantalar aniqlandi. (1) ifoda va akustik toʻlqinlar tezligining qiymatlari, shuningdek zichlik va nur sindirish koʻrsatkichlari boʻyicha adabiyot maʼlumotlaridan foydalanib, oʻrganilayotgan Bragg difraksiya geometriyalari uchun M_2 ning qiymatlari aniqlandi. Ushbu omilning anizotropiyasini aniqlash uchun akustik toʻlqin qutblanish vektorining tarkibiy qismlarini bilish kerak. Ushbu muammoni hal qilish uchun Green-Kristoffel algebraik tenglama tizimidan foydalanish mumkin:

$$(\Gamma_{ik} - \rho V^2 \delta_{ik}) \gamma_k = 0 \quad (4)$$

bu yerda δ_{ik} – Kroneker tenzorining komponentlari, Γ_{ik} – Green-Kristoffel tenzorining komponentlari, ular elastik konstantalar tenzorining birlik toʻlqin normal γ yoʻnalish kosinuslariga nisbatan konvolyutsiyalari:

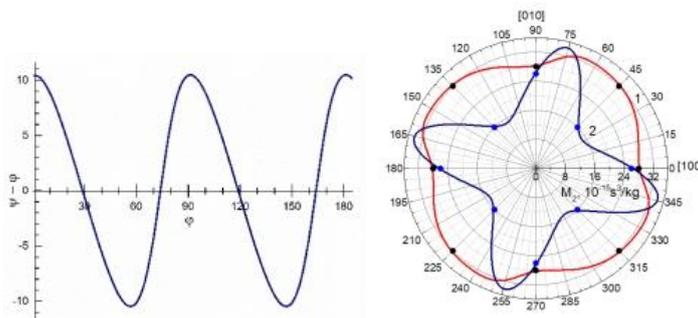
$$\Gamma_{ik} = c_{ijkl} \kappa_j \kappa_l \quad (5)$$

PbMoO₄ kristallari (simmetriya guruhi 4/m) yettita mustaqil elastik konstantaga ega. Bular c_{11} , c_{12} , c_{13} , c_{16} , c_{33} , c_{44} va c_{66} kabi matritsa shaklida yozilishi mumkin. (001) tekislikda akustik toʻlqinning tarqalish yoʻnalishi va [100] oʻqi orasidagi φ burchagi bilan ifodalanishi mumkin. U holda, yoʻnalish kosinuslari $\kappa_1 = \cos\varphi$, $\kappa_2 = \sin\varphi$, $\kappa_3 = 0$, koʻrinishga ega boʻlib, Grin-Kristoffel tenzorining komponentlari (6) ifoda orqali hisoblangan. Hisoblashda quyidagi adabiyot qiymatlardan foydalanilgan: zichlik $6,95 \cdot 10^3$ kg/m³, elastik konstantalar $c_{11} = 10,9 \cdot 10^{10}$ N/m², $c_{12} = 6,83 \cdot 10^{10}$ N/m², $c_{13} = 5,28 \cdot 10^{10}$ N/m², $c_{16} = 1,36 \cdot 10^{10}$ N/m², $c_{33} = 9,17 \cdot 10^{10}$ N/m², $c_{44} = 2,67 \cdot 10^{10}$ N/m² va $c_{66} = 3,37 \cdot 10^{10}$ N/m². Boʻylama toʻlqinlar tezligi va (4) tenglamalar qiymatlaridan foydalanib, polarizatsiya vektorining tarkibiy qismlarini va bu vektorning [100] oʻqiga nisbatan orientatsiya burchagini (001) tekislikda aniqlash mumkin:

$$\psi = \arctg \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \arctg \left(\frac{\rho V^2 - \Gamma_{11}}{\Gamma_{12}} \right) \quad (6)$$

Polarizatsiya vektorining toʻlqin vektori yoʻnalishidan ogʻishi koʻrinishidagi hisoblash natijalari 2-rasmda keltirilgan. Olingan maʼlumotlar asosida PbMoO₄ ning fotoelastik konstantalari aniqlandi: $p_{11} = p_{22} = p_{12} = p_{21} = 0.26$, $p_{33} = 0.29$, $p_{44} = p_{55} = 0.075$, $p_{66} = 0.042$, $p_{13} = p_{23} = 0.27$, $p_{31} = p_{32} = 0.18$, $p_{16} = 0.022$, $p_{61} = 0.015$. Ushbu qiymatlar akustooptik sifat koʻrsatkichining PbMoO₄ kristallaridagi (001) tekislikdagi boʻylama akustik toʻlqinlarning toʻlqin vektori yoʻnalishiga bogʻliqligini hisoblash uchun ishlatilgan. Hisoblash natijalari 2(b)-rasmda koʻrsatilgan. Koʻrinib turibdiki, M_2 koeffitsiyentining eng katta anizotropiyasi (001) tekislikda tarqaladigan akustik toʻlqinlarning toʻlqin vektoriga perpendikulyar qutblanish bilan yorugʻlik

difraksiyasida kuzatiladi. Bunday holda, akustik to‘lqin faqat bo‘ylama bo‘lgan yo‘nalishlar uchun akustooptik sifat ko‘effitsiyentining eng katta va eng kichik qiymatlari kuzatiladi.



a)

b)

2-rasm. PbMoO_4 kristallarida (001) tekislikda bo‘ylama akustik to‘lqinlar qutblanish yo‘nalishining to‘lqin vektori yo‘nalishidan og‘ishi (a). M_2 ko‘effitsiyentining yorug‘lik tovush to‘lqin vektoriga parallel (1) yoki perpendikulyar (2) qutblanganda (001) tekislikdagi bo‘ylama akustik to‘lqin vektori yo‘nalishiga bog‘liqligi (b).

Xususan, ko‘rib chiqilayotgan tekislikda M_2 ko‘effitsiyentining maksimal qiymati $[100]$ o‘qiga 74° va 164° burchaklardagi yo‘nalishlar uchun $34.7 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ ni tashkil qiladi. Bu akustooptik qurilmalarda ishlatiladigan kristallardagi M_2 ko‘effitsiyentning maksimal qiymatlardan biridir.

Uchinchi bobning uchinchi qismi 0,2 mol% neodim qo‘shimchasining qo‘rg‘oshin molibdati kristallarining akustooptik xossalariga ta‘sirini o‘rganishga bag‘ishlangan. Ushbu kristallarda $[100]$ va $[001]$ yo‘nalishlar bo‘ylab tarqaluvchi bo‘ylama akustik to‘lqinlarda Bragg difraksiyasi samaradorligining anizotropiyasi tadqiq etilgan. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, neodim bilan legirlangan qo‘rg‘oshin molibdati kristallarida p_{eff} va M_2 ko‘effitsiyentlari akustik to‘lqinlarning tarqalish yo‘nalishi hamda yorug‘lik va akustik to‘lqin polarizatsiyasiga bog‘liq holda o‘zgargan.

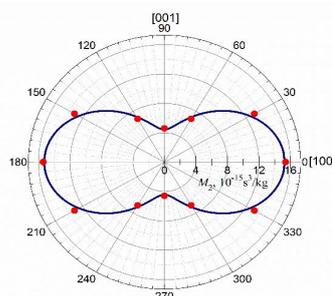
1-jadval

Sof va Nd (0,2 mol%) aralashmali PbMoO_4 kristallarining fotoelastik konstantalari va akustooptik sifat ko‘effitsiyentlari ($\lambda_0=632.8 \text{ nm}$)

Kristall	q	γ	β	p_{eff}	$M_2, 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$
PbMoO_4	$[100]$	$[0.98 \ 0.18 \ 0]$	$[001]$	0.18	9.5
	$[100]$	$[0.98 \ 0.18 \ 0]$	$[100]$	0.26	27.3
	$[001]$	$[001]$	$[100]$	0.27	38.8
	$[001]$	$[001]$	$[001]$	0.29	32.5
$\text{PbMoO}_4:0.2 \text{ Nd}$	$[100]$	$[0.98 \ 0.18 \ 0]$	$[001]$	0,12	4.4
	$[100]$	$[0.98 \ 0.18 \ 0]$	$[100]$	0,19	15.2
	$[001]$	$[001]$	$[100]$	0,21	22.9
	$[001]$	$[001]$	$[001]$	0.24	21.7

Toza va legirlangan PbMoO_4 namunalarida turli yo‘nalishlar va yorug‘lik hamda akustik to‘lqinlarning polarizatsiyalari uchun diffraksiyalangan yorug‘lik intensivligi

qiymatlariga asoslanib, effektiv fotoelastik konstantalar p_{eff} va M_2 sifat ko'effitsiyenti hisoblab chiqilgan. Hisoblash natijalari 1-jadvalda keltirilgan. To'liq vektorlari \mathbf{q} va \mathbf{k} akustik va yorug'lik to'liqlarining tarqalish yo'nalishini, \mathbf{E}_0 tushayotgan yorug'likning qutblanish yo'nalishini ko'rsatadi. 1-jadvaldan ko'rinib turibdiki, neodim qo'shimchasi kiritilgan PbMoO_4 kristallarida effektiv fotoelastik konstanta va akustooptik sifat ko'effitsiyentini akustik to'liqning tarqalish yo'nalishiga va tushayotgan yorug'likning qutblanishiga kuchli bog'liqdir. [100] yo'nalish bo'ylab bo'ylama akustik to'liqlarda yorug'likning difraksiyasi uchun M_2 ko'effitsiyentining yorug'lik polarizatsiyasi yo'nalishiga bog'liqligi 3-rasmda keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, hisoblangan qiymatlar eksperimental qiymatlarga yaxshi mos keladi. Shunday qilib, tushayotgan yorug'likning qutblanish yo'nalishini o'zgartirish orqali Bragg yorug'lik difraksiyasining samaradorligini boshqarish imkoniyati ko'rsatilgan.



3-rasm. $\text{PbMo}_4:0,2\text{Nd}$ kristallarida [100] bo'ylab bo'ylama akustik to'liqlarda yorug'likning Bragg difraksiyasida M_2 ning yorug'lik polarizatsiyasi yo'nalishiga bog'liqligi. Egri chiziq – nazariy hisoblash, nuqtalar – tajriba natijalari.

Uchinchi bobning to'rtinchi qismida (001) tekislikda tarqaladigan bo'ylama va ko'ndalang akustik to'liqlar orqali Bragg yorug'lik difraksiyasida kalsiy molibdati kristallarining elastik va fotoelastik xossalari anizotropiyasini o'rganish natijalari keltirilgan. Akustik to'liqlarning tezligini aniqlash natijalari V va effektiv fotoelastik konstantalar p_{eff} 2-jadvalda keltirilgan bo'lib, unda \mathbf{q} va γ vektorlari mos ravishda to'liq vektori va akustik to'liqlarning qutblanish yo'nalishlarini ko'rsatadi.

2-jadval

CaMoO_4 kristallarida akustik to'liqlarning tezligi, effektiv fotoelastik konstantalar va akustooptik sifat ko'rsatkichi

\mathbf{q}	γ	$V, 10^3 \text{ m/s}$	P_{eff}	$M_2, 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$
[100]	[100]	5.87	$(p_{11}^2 + p_{61}^2)^{1/2} = 0.20$	2.92
	[001]	2.71	$p_{44} = 0.06$	2.67
[001]	[001]	5.44	$p_{33} = 0.08$	0.59
	[100]	2.99	$(p_{44}^2 + p_{45}^2)^{1/2} = 0.086$	4.08
[010]	[010]	5.87	$(p_{11}^2 + p_{61}^2)^{1/2} = 0.20$	2.92
	[001]	2.71	$p_{44} = 0.06$	2.67
[110]	[110]	5.98	$(p_{11} + p_{12})/2 + p_{66} = 0.036$	0.09
	[001]	2.97	$p_{61} = 0.1$	5.62

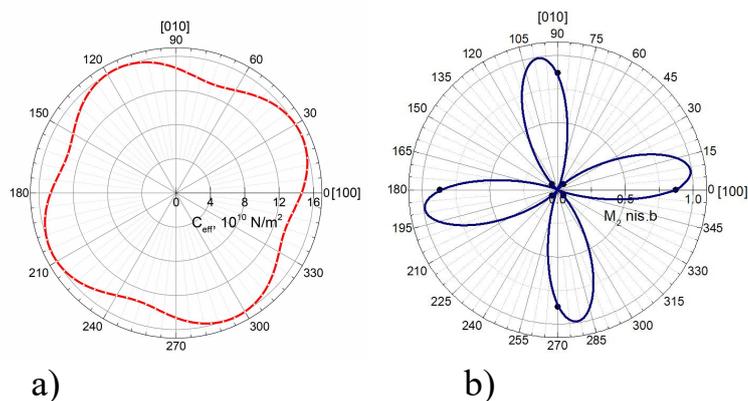
Yorug'lik vektori doimo [001] o'qiga va yorug'likning qutblanish vektori akustik to'liq vektori \mathbf{q} ga parallel yo'nalgan. 2-jadvaldan ko'rinadiki, Bragg yorug'lik difraksiyasining ba'zi geometriyalari uchun effektiv fotoelastik doimiy p_{11} , p_{33} , p_{44} ,

p_{61} kabi fotoelastiklik tenzorining komponentlaridan biri bilan mos keladi. Ushbu komponentlardan, shuningdek, jadvalda keltirilgan akustik to‘lqinlar tezligining nisbati va qiymatlaridan foydalanib, kalsiy molibdati kristallarining elastik va fotoelastik konstantalarining quyidagi qiymatlari aniqlandi: $c_{11}=14,4 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, $c_{12}=6,5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, $c_{13}=4,5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, $c_{16}=1,4 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, $c_{33}=12,6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, $c_{44}=3,69 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, $c_{66}=4,61 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, $p_{11}=0.17$, $p_{12}=-0.15$, $p_{33}=0.08$, $p_{44}=0.06$, $p_{45}=0.062$, $p_{61}=0.1$, $p_{66}=0.026$.

Hisoblash uchun qo‘shimcha qiymatlar adabiyotlardan olingan. Olingan qiymatlar (001) tekislikda bo‘ylama akustik to‘lqinlarning tarqalish yo‘nalishi o‘zgarganda, kalsiy molibdati kristallaridagi effektiv elastik konstantaning anizotropiyasini va akustooptik sifat koeffitsiyentini aniqlash uchun ishlatilgan.

Bo‘ylama akustik to‘lqinlar (001) tekislik bo‘ylab tarqalganda effektiv elastik va fotoelastik konstantalar hamda ularning anizotropiyasini aniqlash maqsadida Grin-Kristoffel tenglamalar tizimi (4) orqali ushbu to‘lqinlarning polarizatsiya vektori komponentlari γ_k hisoblab chiqildi. Natijada, CaMoO_4 kristallarida (001) tekislik bo‘ylab bo‘ylama to‘lqinlar uchun tezlik va effektiv elastik konstanta yo‘nalishga bog‘liqligi aniqlandi. Ushbu tekislikdagi effektiv elastik konstantaning fazoviy anizotropiyasi 4(a)-rasmدا taqdim etilgan.

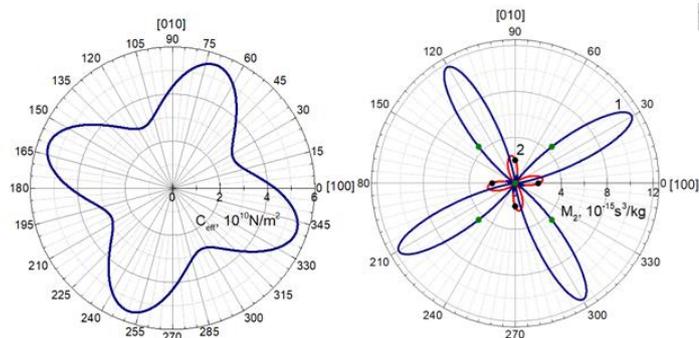
Ko‘rinib turibdiki, c_{eff} ning maksimal qiymati $[100]$ o‘qiga 26° va 116° burchaklar ostida tarqaluvchi bo‘ylama akustik to‘lqinlar uchun kuzatilib, u $16.1 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ ga teng. Umuman olganda, ushbu akustik to‘lqinlar uchun tezlik va effektiv elastik konstantaning anizotropiyasi nisbatan kichik bo‘lib, 20% dan oshmaydi. Bundan tashqari, (1) va (3) ifodalaridan foydalangan holda, bo‘ylama akustik to‘lqinlarda yorug‘lik difraksiyasi uchun M_2 akustooptik sifat koeffitsiyentining anizotropiyasi hisoblab chiqildi. Olingan nisbiy birliklardagi bog‘liqliklar 4(b)-rasmدا taqdim etilgan.



4-rasm. Effektiv elastik konstanta (a) va akustooptik sifat koeffitsiyenti M_2 (b) ning CaMoO_4 kristallaridagi (001) tekislikdagi bo‘ylama akustik to‘lqinning to‘lqin vektori yo‘nalishiga bog‘liqligi.

4b-rasmда M_2 koeffitsiyenti bo‘ylama akustik to‘lqinlarning to‘lqin vektori $[100]$ o‘qiga 5 va 95 gradus burchaklarda yo‘naltirilganda (001) tekislikda eng katta qiymatga yetadi. Bunday holda, M_2 koeffitsiyentining qiymati $2.92 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ ni tashkil qiladi, bu qo‘rg‘oshin molibdati kristallarida ushbu koeffitsiyentning maksimal qiymatlaridan sezilarli darajada past.

Berilgan tekislikdagi ko'ndalang akustik to'lqinlar uchun effektiv elastik doimiy c_{eff} ning to'lqin vektori yo'nalishiga bog'liqligini hisoblash natijalari 5(a) rasmda keltirilgan.



a)

b)

5-rasm. CaMoO₄ kristallarida (001) tekislikdagi effektiv elastik konstantaning to'lqin vektori yo'nalishiga bog'liqligi (a) va ko'ndalang (1) va bo'ylama (2) akustik to'lqinlar uchun akustooptik sifat koeffitsiyenti to'lqin vektori yo'nalishiga bog'liqligi (b).

Yuqorida olingan natijalar va (4) va (5) ifodalardan foydalanib, yorug'likning ko'ndalang akustik to'lqinlarda diffraksiyasida bir xil tekislikdagi akustooptik sifat koeffitsiyentining anizotropiyasi hisoblangan. Natijalar 5b-rasmda keltirilgan bo'lib, bu yerda bo'ylama to'lqinlarda yorug'lik diffraksiyasi holatidagi anizotropiya taqqoslash uchun ko'rsatilgan. 5a-rasmdan ko'rinib turibdiki, ko'ndalang to'lqinlar uchun akustik to'lqin bo'ylama normalar bo'ylab tarqalganda, sof ko'ndalang to'lqinda, c_{eff} o'zining maksimal yoki minimal qiymatiga yetadi. Bundan tashqari, bu qiymatlar mos ravishda $5.58 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ va $2.85 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ ga teng. 6b-rasmda yorug'likning ko'ndalang to'lqinlar bilan difraksiyasi uchun M_2 akustooptik sifat koeffitsiyentining maksimal qiymati bo'ylama to'lqinlar bilan difraksiyaga nisbatan 6 martadan ortiqligini sezish mumkin. Bunday holda, M_2 ning eng katta qiymatlari ko'ndalang akustik to'lqinlarning to'lqin vektori yo'nalishi bo'yicha, (001) tekislikdagi [100] o'qiga taxminan 30 va 120 gradus burchaklarda sodir bo'ladi. Bu kristaldagi bo'ylama normalarning yo'nalishlaridir.

"Vismut germanati va vismut silikati kristallarining akustooptik xossalari anizotropiyasi" nomli to'rtinchi bobning birinchi bo'limida piezo va elektrooptik effektning ta'sirida markaziy simmetrik bo'lmagan kristallardagi akustooptik o'zaro ta'sir xossalari ko'rib chiqish natijalari xususan, vismut germanati va silikati kristallari uchun keltirilgan. Markaziy simmetriyaga ega bo'lmagan kristallar piezoelektrik ta'sirga ega va piezoaktiv akustik to'lqin natijasida yuzaga keladigan deformatsiya ta'sirida ularda elektr maydoni paydo bo'lishi mumkin:

$$E_n = - \frac{e_{mkl} \kappa_m \kappa_l}{\varepsilon_{mn} \kappa_m \kappa_n} u_{kn}, \quad (7)$$

bu yerda κ_m - akustik to'lqinning to'lqin vektorining yo'nalish kosinuslari. Kristaldagi bu E_k elektr maydoni elektrooptik effekt tufayli qutblanish konstantalari α_{ik} ni o'zgartiradi.

$$\Delta\alpha_{ij} = r_{ijk}E_k + R_{ijkl}E_kE_l, \quad (8)$$

bu yerda r_{ijk} elektrooptik koeffitsiyentlar tenzori, R_{ijkl} esa Kerr koeffitsiyentlarining tenzori. Shunday qilib, piezoelektrik va elektrooptik effektlarning ketma-ket ta'siri tufayli kristalning fotoelastikligiga hissa qo'shadigan "bilvosita" yoki "induksiyalangan" fotoelastik effekt paydo bo'ladi. Piezo va elektrooptik effektlarning birgalikdagi ta'sirini hisobga olgan holda va (8) dagi R_{ijkl} koeffitsiyentlarini (7) va (8) dan r_{ijk} koeffitsiyentlariga nisbatan hisobga olmasak, quyidagilarni olamiz:

$$\Delta\alpha_{ij} = [p_{ijkl} - \frac{r_{ijl} \kappa_l \kappa_m e_{mkl}}{\varepsilon_{mn} \kappa_m \kappa_n}] \frac{\partial U_k}{\partial x_l} = [p_{ijkl} - \Delta p_{ijkl}^{ind}] \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \quad (9)$$

Induksiyalangan fotoelastik effekt, bevosita fotoelastiklik kabi, to'rtinchi darajali tenzor tomonidan tavsiflanadi. Lekin bevosita ta'sirdan farq qiladigan simmetriyaga ega, ko'pincha pastroqdir.

$$\Delta p_{ijkl}^{ind} = \frac{r_{ijl} \kappa_l \kappa_m e_{mkl}}{\varepsilon_{mn} \kappa_m \kappa_n} \quad (10)$$

Bir qator hollarda $|\Delta p_{ijkl}^{ind}| \gg |p_{ijkl}|$, shuning uchun Δp_{ijkl}^{ind} nafaqat qiymatni, balki effektiv fotoelastik konstantaning ishorasini ham aniqlay oladi. Markaziy simmetrik bo'lmagan kristallarda p_{eff} kristaldagi akustik to'lqinning tarqalish yo'nalishiga ham, qutblanishiga ham bog'liq, shuning uchun umumiy holatda quyidagicha yozilishi kerak:

$$p_{eff} = p_{ijkl} \alpha_i \beta_j \gamma_k \kappa_l - \Delta p_{ijkl} \alpha_i \beta_j \gamma_k \kappa_l. \quad (11)$$

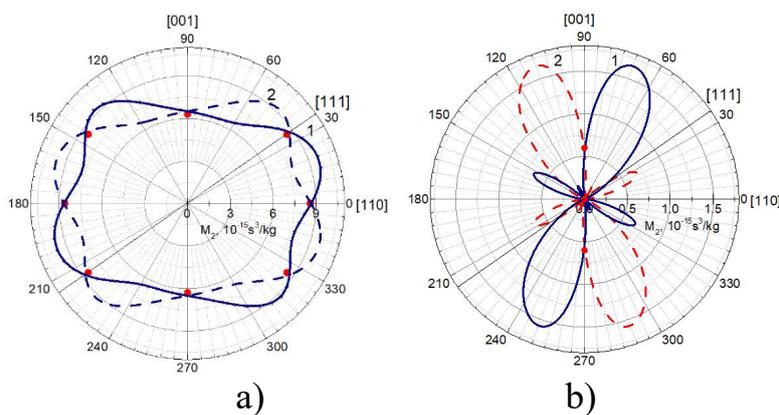
Bundan tashqari, optik faollikni hisobga olish diffraksiyalangan yorug'likning yo'nalish kosinuslari α_i ning tarqalish jarayonida integrallashdan so'ng o'rtacha olingan ifodalar yordamida aniqlanishiga olib keladi:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\varphi + 0.5\delta d) \quad (12)$$

$$\alpha_3 = \sin(\varphi + 0.5\delta d), \quad (13)$$

Shunday qilib, p_{eff} - ko'rib chiqilayotgan kristalning barcha mustaqil fotoelastik konstantalari, tushgan va difraksiyalangan yorug'lik α va β ning shuningdek akustik to'lqinning to'lqin normali va qutblanish vektori κ va γ ning bog'lanishidir.

To'rtinchi bobning ikkinchi qismida akustik to'lqinlar tezligining anizotropiyasini va vismut germanat kristallarida akustooptik sifat koeffitsiyentini o'rganish natijalari keltirilgan. Vismut germanati kristalida tarqaladigan akustik to'lqinlar vektorining [110] o'qiga nisbatan o'zgargan (11) ifodadan effektiv fotoelastik konstantalar aniqlandi. $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ kristallaridagi akustooptik sifat koeffitsiyentining (110) tekislikdagi bo'ylama va ko'ndalang akustik to'lqinlarning to'lqin vektori yo'nalishiga bog'liqligi 6-rasmda ko'rsatilgan.



6-rasm. $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ kristallaridagi akustooptik sifat koeffitsiyentining (110) tekislikdagi bo‘ylama (a) va ko‘ndalang (b) akustik to‘lqinlarning to‘lqin vektoriga bog‘liqligi, yorug‘lik qutblanishi \mathbf{q} vektoriga perpendikulyar (1) va parallel (2).

Ko‘rinib turibdiki, akustooptik sifat koeffitsiyenti M_2 ning anizotropiyasi ayniqsa, ko‘ndalang akustik to‘lqinlarda yorug‘lik diffraksiyasi uchun juda kuchli. M_2 ning maksimal qiymatlari bo‘ylama to‘lqinlarda $9.72 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$, ko‘ndalang to‘lqinlarda $1.68 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ ga teng. Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, vismut germanati kristallaridan akustooptik modulyatorlar va yorug‘lik deflektorlarida faol muhit sifatida foydalanishda M_2 koeffitsiyentining anizotropiyasi qonuniyatlarini hisobga olish zarur.

To‘rtinchi bobning uchinchi qismida vismut silikati kristallaridagi [110] o‘qiga nisbatan (110) tekislikda o‘zgartirilgan akustik to‘lqinlar tezligining anizotropiyasi va akustooptik sifat koeffitsiyentini o‘rganish natijalari ko‘rib chiqildi. Vismut silikati kristalida o‘lchov natijalari va fotoelastik konstantalarni hisoblash 3-jadvalda keltirilgan, bunda \mathbf{q} , \mathbf{k} , γ , β , α vektorlari mos ravishda, tovush va yorug‘likning to‘lqin vektorlari va tovush hamda tushayotgan va diffraksiyalangan yorug‘likning qutblanishi yo‘nalishlarni ko‘rsatadi.

3-jadval

$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ kristallarining piezo- va elektro-optik effektlar ta’siri hisobga olingan kristallarining effektiv fotoelastik doimiylari

\mathbf{q}	γ	\mathbf{k}	β	α	p^P_{eff}	Δp_{eff}	p^E_{eff}	$M_2, 10^{-15}, \text{ s}^3/\text{kg}$
[100]	[100]	[010]	[100]	[100]	p_{11}	0	0.16	14.3
	[001]	[010]	[100]	[001]	p_{44}	0	0.04	11.3
[110]	[110]	[001]	[110]	[110]	$1/4(2p_{11}+p_{21}+p_{12})+p_{44}$	0	0.18	25.2
	[1 $\bar{1}$ 0]	[001]	[110]	[110]	$1/4(p_{21}-p_{12})$	0	≤ 0.01	2.25
	[001]	[1 $\bar{1}$ 0]	[110]	[001]	p_{44}	$\frac{r_{41} \cdot \epsilon_{14}}{4 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}}$	0.036	3.11
[111]	[111]	[100]	[111]	[111]	$1/3(p_{11}+p_{21}+p_{12}+4p_{44})$	$\frac{4 \cdot r_{41} \cdot \epsilon_{14}}{3 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}}$	0.17	24.3
	[1 $\bar{1}$ 0]	[110]	[111]	[1 $\bar{1}$ 0]	$1/6(2p_{11}-p_{21}-p_{12}+2p_{44})$	0	0.025	1.98

3-jadvaldan ko‘rinib turibdiki, bo‘ylama akustik to‘lqin bilan tarqaladigan va [100] o‘qi bo‘ylab qutblangan yorug‘lik uchun piezoelektrooptik qo‘shimcha Δp_{eff} nolga teng. Bunda yorug‘likning [110] o‘qi bo‘ylab ko‘ndalang akustik to‘lqinlarga

difraksiyasi bilan piezoelektrooptik qo‘shimcha Δp_{eff} ni hisobga olgan holda effektiv fotoelastik konstanta uchun quyidagi munosabatni olamiz:

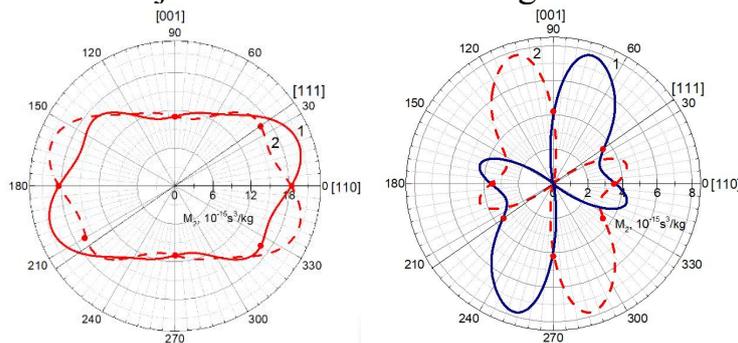
$$|p_{\text{eff}}| = \left| p_{44} - \frac{r_{41}e_{14}}{4 \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_{11}} \right|, \quad (14)$$

Shu bilan birga, polarizatsiyasi [111] bo‘lgan yorug‘lik [111] o‘qi bo‘ylab bo‘ylama akustik to‘lqin orqali difraksiyalansa:

$$|p_{\text{eff}}| = \left| \frac{1}{3}(p_{11} + p_{12} + p_{21} + 4p_{44}) - \frac{4 \cdot r_{41}e_{14}}{3 \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_{11}} \right|, \quad (15)$$

chunki bu geometriyadagi Δp_{11} , Δp_{12} va Δp_{21} piezoelektrooptik qo‘shimchalar nolga teng. (14) va (15) da $e_{\alpha\beta}$, $r_{\alpha\beta}$ va $\varepsilon_{\alpha\beta}$ - mos ravishda piezoelektrik, elektrooptik va dielektrik tenzorlarning matritsa shaklida komponentlari hisoblanadi.

Effektiv fotoelastik konstantalarning olingan qiymatlari va akustik to‘lqinlarning tarqalish tezligi (1) va (16) ifodalar yordamida (110) tekislikdagi akustik to‘lqinning to‘lqin vektori yo‘nalishiga akustooptik sifat koeffitsiyentining bog‘liqligini hisoblash uchun ishlatilgan. Tushgan yorug‘likning qutblanishi akustik to‘lqinning to‘lqin vektoriga parallel (qisqa chiziq) va perpendikulyar (uzluksiz chiziq) bo‘lgan holatlar uchun hisoblash natijalari 7-rasmda ko‘rsatilgan..



a)

b)

7-rasm. $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ kristallaridagi akustooptik sifat koeffitsiyentining (110) tekislikdagi bo‘ylama (a) va ko‘ndalang (b) akustik to‘lqinlarning to‘lqin vektoriga bog‘liqligi, yorug‘lik qutblanishi q vektoriga perpendikulyar (1) va parallel (2).

6 va 7-rasmlardan ko‘rinib turibdiki, vismut germanati va vismut silikati kristallarida, (110) tekislikdagi bo‘ylama akustik to‘lqinlarda Bragg yorug‘lik difraksiyasi M_2 ning maksimal qiymatini piezoelektrooptik qo‘shimcha va ulardagi optik faollikni hisobga olgan holda, [110] o‘qiga 20° (yorug‘likning polarizatsiyasiga perpendikulyar) va 160° (yorug‘likning polarizatsiyasiga parallel) burchaklardagi yo‘nalishlar uchun kuzatiladi. Bu qiymatlar BSO kristallaridagi bo‘ylama to‘lqinlar uchun $20,7 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ va ko‘ndalang to‘lqinlar uchun $7,83 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ ni tashkil qiladi. Olingan natijalar PbMoO_4 ($26 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$) va TeO_2 ($34 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$) kabi eng yuqori akustooptik sifatli kristallardagi bo‘ylama to‘lqinlar uchun M_2 ga yaqin.

Shunday qilib, markaziy simmetriyaga ega bo‘lmagan kristallardagi akustik to‘lqinlarda yorug‘likning Bragg difraksiyasini o‘rganish natijalari bunday nurlarning akustooptik samaradorligida piezo- va elektro-optik effektlarning qo‘shimcha hissasining ta‘sirini hisobga olish zarurligini ko‘rsatadi. Ushbu hissa ularning

fotoelastik xususiyatlarining anizotropiyasini o'zgartiradi va bu kristallardan foydalangan holda akustooptik qurilmalarni ishlab chiqishda hisobga olinishi kerak.

XULOSA

“PbMoO₄, CaMoO₄, Bi₁₂GeO₂₀ va Bi₁₂SiO₂₀ kristallarida akustooptik xossalarning anizotropiya qonuniyatlari” mavzusidagi falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar natijasida quyidagi xulosalar taqdim etildi:

1. Qo'rg'oshin molibdati, kalsiy molibdati, shuningdek, vismut germanati va vismut silikati kristallari uchun elastiklik va fotoelastiklik tenzorlarining barcha mustaqil komponentlari (c_{11} , c_{12} , c_{13} , c_{16} , c_{33} , c_{44} , c_{66} va p_{11} , p_{12} , p_{13} , p_{16} , p_{33} , p_{44} , p_{45} , p_{66}) aniqlandi.

2. Tadqiq qilingan kristallarda akustik to'lqinlarning tarqalish tezligi va effektiv elastiklikning o'zgarish qonuniyati (100) va (110) kristallofizik tekisliklarda, piezoeffekt ta'siri hisobga olingan holda belgilandi.

3. Effektiv fotoelastik konstantalar uchun olingan ifodalarga asoslanib, qo'rg'oshin molibdati kristallarida akustooptik sifat koeffitsiyenti M_2 ning eng katta anizotropiyasi yorug'likning akustik to'lqinlar to'lqin vektoriga perpendikulyar qutblanganda (001) tekislikda difraksiyalanishida kuzatilishi ko'rsatildi. Shu holatda, M_2 koeffitsiyenti akustik to'lqinlar bo'ylama normal yo'nalishda tarqalganida maksimal ($34,7 \cdot 10^{-15}$ s³/kg) va minimal ($14,5 \cdot 10^{-15}$ s³/kg) qiymatga yetdi.

4. Kalsiy molibdati kristallarida sof ko'ndalang akustik to'lqinlar bo'yicha yorug'lik difraksiyasida, akustooptik sifat koeffitsiyentining maksimal qiymati ($12 \cdot 10^{-15}$ s³/kg) bo'lib, bu bo'ylama akustik to'lqinlardagi difraksiya holatiga nisbatan 6 marta yuqori ($2 \cdot 10^{-15}$ s³/kg) va eng yuqori akustooptik xususiyatli kristallar PbMoO₄ hamda TeO₂ dagi M_2 koeffitsiyentining qiymatlari bilan taqqoslash mumkin.

5. PbMoO₄ kristallariga neodim qo'shilganida, effektiv fotoelastiklik yorug'lik qutblanish yo'nalishiga kuchli bog'liqligi (1.5 marta) aniqlanib, bu esa Bragg difraksiyasining samaradorligini boshqarish imkonini beradi.

6. Ilk bor vismut germanati va vismut silikati kristallarida piezoaktiv akustik to'lqinlarda yorug'lik difraksiyasida induksiyalangan fotoelastik effekt akustik to'lqinning kristalldagi tarqalish va qutblanish yo'nalishiga bog'liqligi hamda akustooptik sifat koeffitsiyentining anizotropiyasi tabiatiga kuchli ta'sir qilishi aniqlandi.

7. Bragg difraksiyasining vismut germanati va vismut silikat kristallaridagi piezoaktiv akustik to'lqinlar bilan bog'liq qonuniyatlari o'rganilib, induksiyalangan piezo-elektrooptik effekt va optik faollik ta'sirini hisobga olish orqali difraksiyalangan yorug'lik intensivligini 25% gacha oshirish mumkinligi ko'rsatildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И
ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ЭЛБОЕВА МОХИНУР ИМОМНАЗАР КИЗИ

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ АНИЗОТРОПИИ АКУСТООПТИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ В КРИСТАЛЛАХ $PbMoO_4$, $CaMoO_4$, $Bi_{12}GeO_{20}$ и $Bi_{12}SiO_{20}$**

01.04.03- Молекулярная физика и теплофизика

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2025.1.PhD/FM1121.

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.iplt.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель: Ахмеджанов Фархад Рашидович
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: Бахрамов Сагдулла Абдуллаевич
доктор физико-математических наук,
академик

Кодиров Мумин Кодирович
доктор физико-математических наук,
профессор

Ведущая организация: Институт материаловедения Академии наук
Республики Узбекистан

Защита диссертации состоится «14» октября 2025 года в 14:30 часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йўли 33. Тел./факс: (+99871)-262-32-54; e-mail: info@iplt.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (регистрационный № 15), по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йўли 33. Тел.: (+99871)-262-31-69.

Автореферат диссертации разослан «02» октября 2025 г.
(протокол реестра № 15 от «02» октября 2025 г.)



Х.Б. Ашуров

Председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.т.н., профессор

И.Д. Ядгаров

Ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н.,
профессор

У.К. Махманов

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 молибдата свинца, молибдата кальция и германата и силиката висмута широко используются в технике в качестве рабочих сред различных акустических и акустооптических устройствах. Особенно часто при создании акустооптических и акустоэлектронных приборов применяются кристаллы молибдата свинца. Все эти монокристаллы имеют широкий диапазон прозрачности (0,35–6,0 мкм), и обладают достаточно большим двулучепреломлением, что позволяет использовать их в качестве активной рабочей среды в акустооптических электронно-перестраиваемых фильтрах, в акустических и акустооптических линиях задержки и акустооптических преобразователях управления оптическим излучением. В то же время анизотропия акустооптических свойств этих кристаллов до сих пор детально не изучена.

Рабочими срезами кристаллов, как правило, являются срезы перпендикулярные к осям симметрии второго и более высокого порядка. Так, например, поперечная акустическая волна, распространяющаяся в кристаллах молибдата свинца вдоль оси [001] (направление, перпендикулярное к оси четвертого порядка), соответствует большому значению коэффициента акустооптического качества необходимым для приборов с анизотропным акустооптическим взаимодействием. Исследование анизотропии фотоупругих свойств кристаллов представляется также важным в интересах многих задач нелинейной акустики. Такие исследования помимо фундаментального интереса важны для определения наиболее эффективных срезов этих кристаллов, знание которых необходимо при разработке акустооптических устройств нового поколения. В целом, получение фундаментальных знаний о закономерностях анизотропии акустооптических свойств, в таких кристаллах несомненно, является актуальной задачей молекулярная физика и теплофизика.

В последние годы в Республике Узбекистан уделяется большое внимание фундаментальным исследованиям в области материаловедения – поиску новых материалов и изучению свойств уже известных материалов, включая акустические и акустооптические свойства кристаллов, используемых в различных отраслях экономики страны. В том числе такие исследования проводятся в ИИПЛТ, ФТИ, ИЯФ и Институте материаловедения АН РУз, в НУУ им. Мирзо Улугбека, СамГУ и в других НИИ и ВУЗах республики. Направления этих фундаментальных и прикладных исследований имеют большое значение для развития науки и наукоемкого производства в Узбекистане и соответствуют стратегии¹ развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы, которая определена в указе и решениях Президента Республики

¹Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 гг.» от 28 января 2022 г.

Узбекистан «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы» (№ УП -60 ПК-3012 от 28 января 2022 года).

Эти же задачи предусмотрены в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан: ПФИ-2 - «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение». Тема диссертационной работы тесно связана с Государственными научно-техническими программами фундаментальных и прикладных исследований на 2018-2024 годы.

Степень изученности проблемы. Исследованию акустооптических свойств кристаллов различной симметрии посвящен ряд экспериментальных и теоретических работ ведущих ученых мира. Следует отметить исследования ученых Дж Такера, В. Рэмптона Г.А. Кокуина, Д.А. Пиннова, Р.В. Диксона и М.Г. Коэна, (США), Э. Дьелесана и Д. Руайе (Франция), а также британского ученого Р. Ньюнхама, которые изучали взаимодействие акустических и оптических волн в широком спектре частот в различных кристаллах, включая кристаллы танталата и ниобата лития, молибдата свинца и силиката висмута. В теоретических и экспериментальных работах ученых из России, таких как В.И. Балакший, В.Б. Волошинов, Ю.В. Гуляев, В.В. Леманов В.В. Проклов исследовались основные акустооптические свойства, включая фотоупругие постоянные, кристаллов различной симметрии для некоторых геометрий дифракции света на звуке. Ряд акустооптических характеристик кристаллов силиката и германата висмута был изучен учеными из Белоруссии (В.Н. Белый, Г.В. Кулак и др.) и Украины (Б.Г. Мыцык, А. Ерба, Н.М. Демьянишин).

Ученые из Узбекистана П.К. Хабибуллаев, С.З. Мирзаев, З.Т. Азаматов, Л.М. Сабиров, Ф.Р. Ахмеджанов, Д.И. Семенов и др., внесли определенный вклад в развитие исследований в области физической акустики. Ими исследованы акустические и акустооптические свойства ряда диэлектрических и жидких кристаллов и бинарных растворов как ультразвуковыми методами, так и методами Брэгговской дифракции света и рассеяния Мандельштама – Бриллюэна.

В то же время, детальные исследования анизотропии акустооптических свойств в кристаллах молибдата свинца, молибдата кальция и германата и силиката висмута практически отсутствуют, а имеющиеся данные по этим свойствам являются разрозненными. Между тем, знание анизотропии акустооптических свойств этих кристаллов, необходимо при разработке и применении их в качестве активной среды в акустооптических устройствах обработки информации.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научного учреждения, где выполнена

диссертация. Диссертационная работа выполнялась в рамках научно-исследовательских проектов, выполняемых в лаборатории «Теплофизики многофазных систем» Института ИПЛТ АН РУз, а также была частью исследований по госбюджетной теме института: «Нелинейные явления, фазовые переходы и анизотропия упругих, фотоупругих и суперионных свойств в диэлектрических и сегнетоэлектрических кристаллах» на 2021–2024 годы.

Цель исследования является определение анизотропии акустооптических свойств в кристаллах молибдата свинца, молибдата кальция, германата висмута и силиката висмута.

Задачи исследования:

определить значения всех независимых упругих и фотоупругих постоянных в кристаллах молибдатов свинца, кальция, германата и силиката висмута с помощью Брэгговской дифракции света на акустических волнах;

установить закономерности анизотропии скорости акустических волн и эффективных фотоупругих констант в кристаллах молибдатов свинца, и кальция и германата и силиката висмута, в наиболее важных с точки зрения практического применения кристаллографических плоскостях с учетом влияния пьезоэлектрического эффекта;

получить выражения для эффективных фотоупругих констант, позволяющие выявить закономерности в ориентационной зависимости коэффициента акустооптического качества в исследованных кристаллах;

определить влияние примеси неодима в кристаллах $PbMoO_4$ на величину и анизотропию коэффициента акустооптического качества;

выявить влияние оптической активности и пьезо- и электрооптического эффектов на величину и анизотропию коэффициента акустооптического качества в кристаллах силиката и германата висмута.

Объектом исследования являются кристаллы молибдата свинца и молибдата кальция, германата висмута и силиката висмута.

Предметом исследования являются эффективные упругие и фотоупругие параметры, а также коэффициенты акустооптического качества кристаллов свинцового молибдата, кальциевого молибдата, висмут германата и висмут силиката в зависимости от направления вектора волны.

Методы исследования. Для определения монокристалличности и структурных свойств кристаллов, их размеров, оценки деформаций и получения информации о структуре были проведены анализы методами рентгеновской дифракции (РДА) и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Для определения скорости акустических волн в кристаллах использовался акустооптический метод, а для определения эффективных фотоупругих констант материалов — модифицированный метод Диксона-Коэна.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые определена анизотропия эффективных упругих постоянных в кристаллах молибдата свинца и молибдата кальция для акустических волн, распространяющихся в плоскостях (100) и (001), которая влияет на

закономерности изменения коэффициента акустооптического качества в этих кристаллах;

впервые установлено, что в кристаллах молибдата кальция при дифракции света на чистопоперечных акустических волнах вдоль продольных нормалей, максимальное значение коэффициента акустооптического качества M_2 ($12 \cdot 10^{-15} \text{с}^3/\text{кг}$) на порядок больше, чем при дифракции на продольных волнах ($2 \cdot 10^{-15} \text{с}^3/\text{кг}$) и сравнимо со значениями этого коэффициента M_2 в таких акустооптически добротных кристаллах как PbMoO_4 и TeO_2 .

впервые получены уравнения для определения эффективных фотоупругих констант и коэффициента акустооптического качества в кристаллах германата и силиката висмута с учетом вклада пьезо- и электрооптического эффектов и оптической активности в этих кристаллах.

Показано, что в кристаллах молибдата свинца с примесью неодима сильное снижение коэффициента акустооптического качества (1.5 раз) объясняется тем, что высокая подвижность ионов неодима в кристаллической решетке PbMoO_4 частично подавляет фотоупругий эффект при взаимодействии акустических волн со светом.

Установлено, что в кристаллах германата висмута и силиката висмута учет пьезо- и электрооптического эффектов и оптической активности в них, приводит к появлению направлений, вдоль которых наблюдается максимальное значение акустооптической добротности M_2 , в том числе под углом 20 градусов при перпендикулярной поляризации падающего света и 160 градусов при параллельной поляризации градусов к оси [110].

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Полученные значения фотоупругих констант кристаллов германата и силиката висмута, молибдатов кальция и свинца позволяют определить направления в этих кристаллах с максимальным коэффициентом акустооптического качества и повысить эффективность Брэгговской дифракции света как на продольных, так и на поперечных акустических волнах.

Найденные закономерности в изменении коэффициента акустооптического качества в исследованных кристаллах позволяют путем выбора оптимальной геометрии увеличить интенсивность дифрагированного света в акустооптических устройствах.

Достоверность результатов исследования обуславливается использованием хорошо известных акустических и акустооптических методов исследования взаимодействия оптических волн с акустическими волнами в кристаллах, большим объемом экспериментальных результатов и их согласованностью с фундаментальными законами и основными положениями физики конденсированного состояния, а также совпадением полученных результатов с некоторыми экспериментальными данными других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость заключается в том, что впервые показано, что в кристаллах молибдата кальция при дифракции света на чисто поперечных акустических волнах коэффициент акустооптического качества M_2 на порядок больше, по сравнению с его значением при дифракции на продольных волнах.

Также впервые установлена закономерность в изменении коэффициента акустооптического качества от направления распространения акустических волн в кристаллах, германата и силиката висмута с учетом вклада пьезо- и электрооптического эффектов.

Практическая значимость заключается в том, что на основе исследованной зависимости эффективных фотоупругих констант и коэффициента акустооптического качества от направления распространения акустических волн в кристаллах молибдата свинца и молибдата кальция расширяется области применения этих кристаллов в акустооптических фильтрах, модуляторах и дефлекторах. Кроме того полученные значения компонент тензора фотоупругости в исследованных кристаллах могут использоваться в качестве справочного материала при разработке современных акустооптических устройств на их основе.

Внедрение результатов исследования. По результатам исследований, проведенных в диссертационной работе, с целью установления закономерностей анизотропии акустооптических свойств в кристаллах молибдата свинца, молибдата кальция и германата и силиката были внедрены следующие результаты:

Полученные результаты научных исследований были использованы при выполнении прикладного проекта УЗБ-Инд-2021-78 на тему «Термоэлектрические свойства силикатов, легированных оксидами металлов и процессы самоорганизации» выполненной на кафедре «Фотоника» физического факультета Национального университета имени Мирзо Улугбека Узбекистана (Письмо Национального Университета Узбекистана № 01/11 – 3541 от 12.03.2025). В частности, результаты по определению пьезо- и электрооптических констант, а также компонент тензора фотоупругости в кристаллах силиката висмута были использованы для объяснения закономерности изменения оптических и пьезоэлектрических свойств легированных силикатов при механическом воздействии;

теоретическая часть результатов диссертационной работы, полученные при исследовании анизотропии акустооптического взаимодействия в кристаллах молибдата свинца, были использованы в рамках проекта № 413100036, поддержанного Фондом фундаментальных исследований Института технологических наук Уханьского университета (Китай). (The Letter from Institute of Technological Sciences, Wuhan University, Wuhan city, China–November18, 2024). Полученные результаты позволили найти эффективные сечения, характеризующие Брэгговскую дифракцию света на акустических волнах в кристаллах тетрагональной и кубической сингонии;

результаты, опубликованные нами в журнале Ultrasonics, нашли отражение в ряде зарубежных научных исследований (Optical Materials, 2024, Vol. 148, 114880; Optical Materials, 2024, Vol. 157, Part 2, 116320; RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, 2024, Vol. 16, No. 7, с. 837–846). Полученные данные способствовали интерпретации эффектов акустооптического взаимодействия в кристаллах фтороберилата аммония с учётом пьезооптического и эластооптического вкладов, исследованию

пьезооптических характеристик кристаллов Rb_2SO_4 , а также моделированию влияния акустических волн на волноводные микроструктуры кремния.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследований по теме диссертации были представлены и обсуждены на 6 международных и 8 республиканских научных конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 23 научные работы, в том числе 9 публикаций в научных журналах, включая 2 работы в журналах, индексируемых в базе Scopus, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации научных результатов докторских диссертаций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 112 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показана связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан, рассмотрена степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи исследования. Приведены 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 «**Обзор теоретических и экспериментальных работ по акустическим и акустооптическим свойствам кристаллов PbMoO_4 , CaMoO_4 , $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$** » приведены сведения по распространению акустических волн в кристаллах и их взаимодействию с оптическими волнами.

В первом разделе главы рассмотрены уравнения Грина-Кристоффеля, которые определяют пространственную дисперсию фазовой скорости акустических волн и их поляризацию. Показано, что в пьезоэлектрических кристаллах пьезоэффект увеличивает скорость акустической волны. Указан общий метод нахождения направлений, вдоль которых распространяются чистопродольные и/или чистопоперечные волны. Показано, что направление потока энергии в волне, в общем случае, не совпадает с направлением ее распространения.

Во втором разделе приведены основные положения теории дифракции света на акустических волнах, рассмотрены условия и особенности дифракции в режимах Рамана-Ната и Брэгга. Показано, что для анизотропной среды вместо теории Поккельса необходимо применять обобщенную теорию фотоупругого эффекта, согласно которой дополнительные вклады в фотоупругие константы могут быть сравнимы с основным вкладом.

В третьем разделе приведены основные положения теории Брэгговской дифракции света на акустических волнах и рассмотрены ее особенности. Показано, что основным параметром, характеризующим эффективность

Брэгговской дифракции света является введенный Диксоном коэффициент акустооптического качества M_2 , который определяется выражением:

$$M_2 = \frac{n^6 p_{эфф}^2}{\rho V^3}, \quad (1)$$

где ρ - плотность материала; V - скорость акустической волны; n —показатель преломления. $p_{эфф}$ - эффективная фотоупругая постоянная.

В четвертом разделе приведен обзор опубликованных экспериментальных работ по кристаллам германата висмута, силиката висмута, молибдата свинца и молибдата кальция, из которого видно, что несмотря на большое количество публикаций по их акустооптическим свойствам, анизотропия этих свойств практически не исследована.

Во второй главе «**Методы и установки для исследования акустооптических и структурных свойств кристаллов $PbMoO_4$, $CaMoO_4$, $Bi_{12}GeO_{20}$ и $Bi_{12}SiO_{20}$** » рассмотрены методы и измерительные установки, которые применялись для проведения исследования упругих и фотоупругих свойств кристаллов $PbMoO_4$, $CaMoO_4$, $Bi_{12}GeO_{20}$ и $Bi_{12}SiO_{20}$.

В первом разделе главы рассмотрены акустооптические методы исследования кристаллов и их применимость в различных частотных диапазонах. Приведены условия и особенности дифракции света в режимах Рамана-Ната и Брэгга.

Во втором разделе детально рассмотрен акустооптический метод исследования, основанный на Брэгговской дифракции света, и акустооптическая измерительная система. Скорость распространения акустической волны V с частотой ω определялась через соотношение:

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

где θ_B — внешний угол Брэгговской дифракции света.

В третьем разделе описано определение эффективных фотоупругих констант модифицированным методом Диксона-Коэна, когда акустическая волна возбуждается пьезопреобразователями поочередно сначала со стороны эталона, затем со стороны исследуемого образца. В качестве эталона использовался образец плавленого кварца. Схема метода представлена на рис. 1.

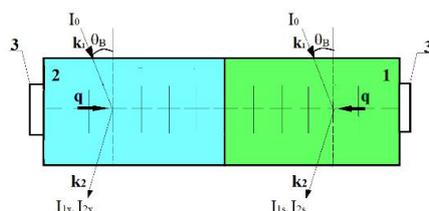


Рис. 1. Схема определения эффективной фотоупругой константы модифицированным методом Диксона-Коэна.

На рис. 1 использованы обозначения: 1 — эталон, 2 — исследуемый образец, 3 — пьезодатчик, q — волновой вектор акустической волны, k_1 и k_2 —

волновые векторы падающего и дифрагированного света, I_0 – интенсивность падающего света. Сначала акустическая волна возбуждается со стороны эталона и измеряются интенсивности света, дифрагированного в эталоне I_{1s} и образце I_{1x} . Затем акустическая волна возбуждается со стороны образца и снова измеряются интенсивности света в образце I_{2x} и в эталоне I_{2s} .

Эффективные фотоупругие константы определяются выражением:

$$\left[\frac{p_{\text{эфф}}^2 n^6}{\rho V^3 (n+1)^4} \right]_x = \left[\frac{p_{\text{эфф}}^2 n^6}{\rho V^3 (n+1)^4} \right]_s \left(\frac{I_{1x} I_{2x}}{I_{1s} I_{2s}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где ρ – плотность кристалла; n – показатель преломления света.

В выражении (3) обозначения «s» и «x» указывают соответственно на характеристики эталонного и исследуемого образцов. Точность определения эффективной фотоупругой константы составляла примерно 20 %.

В четвертом 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 акустооптических свойств кристаллов молибдата свинца и молибдата кальция», в первом разделе проведены результаты выборочная проверка образцов силиката и германата висмута и молибдата кальция методом рентгеноструктурного анализа и рамановской спектроскопии. Дополнительно определены параметры их кристаллической решетки и подтверждено отсутствие примесей. Результаты подтвердили, что исследованные кристаллы имеют высокое качество, и являются фазово-чистыми.

В втором разделе приведены результаты исследования анизотропии упругих и фотоупругих свойств кристаллов молибдата свинца. Из измеренных значений скорости акустических волн и интенсивностей дифрагированного света для различных геометрий дифракции света и соотношения (3) были определены эффективные фотоупругие константы в кристаллах молибдата свинца. Затем, используя выражение (1) и значения скорости акустических волн, а также литературные данные по плотности и показателях преломления были определены значения коэффициента акустооптического качества.

Для определения анизотропии этого коэффициента необходимо знание компонент вектора поляризации акустических волн. Для решения этой задачи можно использовать систему алгебраических уравнений Грина–Кристоффеля:

$$(\Gamma_{ik} - \rho V^2 \delta_{ik}) \gamma_k = 0, \quad (4)$$

где δ_{ik} и Γ_{ik} – компоненты, соответственно, тензоров Кронекера и Грина-Кристоффеля, которые определяются через компоненты тензора упругости направляющие косинусы единичной нормали волны \mathbf{k} :

$$\Gamma_{ik} = c_{ijkl}k_jk_l. \quad (5)$$

Кристаллы PbMoO_4 (группа симметрии $4/m$) имеют семь независимых упругих констант: c_{11} , c_{12} , c_{13} , c_{16} , c_{33} , c_{44} и c_{66} . В плоскости (001), направление распространения акустической волны можно задавать углом φ между этим направлением и осью [100]. Тогда, направляющие косинусы имеют вид $k_1=\cos\varphi$, $k_2=\sin\varphi$, $k_3=0$, а компоненты тензора Грина-Кристоффеля вычисляются с помощью выражения (5).

В расчете использовались литературные значения: плотность $6,95 \cdot 10^3$ кг/м³, упругие постоянные $c_{11}=10,9 \cdot 10^{10}$ Н/м², $c_{12}=6,83 \cdot 10^{10}$ Н/м², $c_{13}=5,28 \cdot 10^{10}$ Н/м², $c_{16}=1,36 \cdot 10^{10}$ Н/м², $c_{33}=9,17 \cdot 10^{10}$ Н/м², $c_{44}=2,67 \cdot 10^{10}$ Н/м² и $c_{66}=3,37 \cdot 10^{10}$ Н/м². Далее, используя значения скорости продольных волн и уравнения (4), можно определить компоненты вектора поляризации и угол ориентации этого вектора относительно оси [100] в плоскости (001) из соотношения:

$$\psi = \arctg \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \arctg \left(\frac{\rho V^2 - \Gamma_{11}}{\Gamma_{12}} \right) \quad (6)$$

Результаты расчета в виде отклонения вектора поляризации от направления волнового вектора представлены на рис. 2.

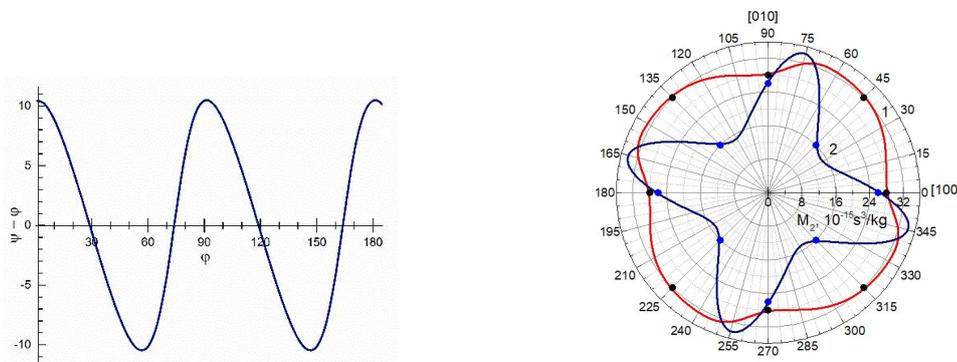


Рис. 2. Отклонение направления поляризации продольных акустических волн от направления волнового вектора (а). Зависимость коэффициента M_2 в кристаллах PbMoO_4 от направления волнового вектора продольного звука в плоскости (001) при поляризации света параллельно (1) или перпендикулярно (2) волновому вектору звука (б).

На основе полученных данных определены фотоупругие константы PbMoO_4 : $p_{11}=p_{22}=p_{12}=p_{21}=0.26$, $p_{33}=0.29$, $p_{44}=p_{55}=0.075$, $p_{66}=0.042$, $p_{13}=p_{23}=0.27$, $p_{31}=p_{32}=0.18$, $p_{16}=0.022$, $p_{61}=0.015$. Эти значения использовались для расчета зависимости коэффициента акустооптического качества от направления волнового вектора продольных волн в плоскости (001) в кристаллах PbMoO_4 . Результаты расчета представлены на рис. 2 (б).

Видно, что наибольшая анизотропия коэффициента M_2 наблюдается при дифракции света с поляризацией, перпендикулярной волновому вектору акустических волн в плоскости (001). В частности, в рассматриваемой плоскости максимальное значение коэффициента M_2 равно $34.7 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ для направлений под углами 74 и 164 градусов к оси [100], что является одним из максимальных значений этого коэффициента в кристаллах, используемых в акустооптических устройствах.

В третьем разделе третьей главы приведены результаты исследования влияния примеси неодима (0,2 моль%) на акустооптические свойства кристаллов PbMoO_4 . Изучена анизотропия эффективности Брэгговской дифракции света на продольных акустических волнах вдоль направлений [100] и [001] в этих кристаллах. Показано, что в легированных кристаллах PbMoO_4 существует зависимость $p_{\text{эфф}}$ и M_2 от направления распространения и поляризации акустической волны и поляризации света.

На основе полученных значений интенсивностей дифрагированного света в чистых и легированных образцах PbMoO_4 были рассчитаны эффективные фотоупругие константы $p_{\text{эфф}}$ и коэффициент качества M_2 . Результаты расчета представлены в таблице 1. Волновые вектора \mathbf{q} и \mathbf{k} указывают направление распространения акустических и световых волн, \mathbf{E}_0 – направление поляризации падающего света ($\lambda_0=632.8 \cdot \text{нм}$).

Таблица 1

Коэффициенты акустооптического качества и эффективные фотоупругие константы в чистых и с примесью неодима (0.2 моль%) кристаллах PbMoO_4

Кристалл	\mathbf{q}	γ	β	$p_{\text{эфф}}$	$M_2, 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$
PbMoO_4	[100]	[0.98 0.18 0]	[001]	0.18	9.5
	[100]	[0.98 0.18 0]	[100]	0.26	27.3
	[001]	[001]	[100]	0.27	38.8
	[001]	[001]	[001]	0.29	32.5
$\text{PbMoO}_4:0.2$ Nd	[100]	[0.98 0.18 0]	[001]	0,12	4.4
	[100]	[0.98 0.18 0]	[100]	0,19	15.2
	[001]	[001]	[100]	0,21	22.9
	[001]	[001]	[001]	0.24	21.7

Из табл. 1 видно, что в кристаллах PbMoO_4 с примесью неодима наблюдается сильная зависимость эффективной фотоупругой константы и коэффициента качества M_2 от направления распространения волны и поляризации падающего света. Зависимость коэффициента M_2 при дифракции на продольных волнах вдоль [100] от поляризации света приведена на рис.3.

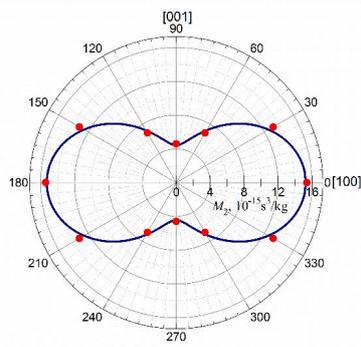


Рис.3. Зависимость коэффициента качества M_2 от поляризации света, при дифракции света на продольных акустических волнах вдоль $[100]$ в кристаллах $\text{PbMoO}_4:0.2\text{Nd}$. Кривая линия - расчет, точки –эксперимент

Видно, что расчетные значения хорошо совпадают с экспериментальными значениями. Таким образом, показана возможность управления эффективностью Брэгговской дифракции света изменяя направление поляризации падающего света.

В четвертом разделе главы приведены результаты исследования анизотропии упругих и фотоупругих свойств кристаллов молибдата кальция при Брэгговской дифракции света на продольных и поперечных волнах, распространяющихся в плоскости (001) . Результаты исследований приведены в таблице 2, в которой векторы \mathbf{q} и $\boldsymbol{\gamma}$ указывают, соответственно, направления волнового вектора и поляризации акустических волн. При этом волновой вектор света всегда параллелен оси $[001]$ а вектор поляризации света параллелен волновому вектору акустических волн \mathbf{q} .

Таблица 2

Скорость акустических волн, эффективные фотоупругие константы и акустооптическая добротность в кристаллах CaMoO_4

\mathbf{q}	$\boldsymbol{\gamma}$	$V,$ 10^3м/с	$\rho_{\text{эфф}}$	$M_2,$ $10^{-15} \text{с}^3/\text{кг}$
[100]	[100]	5.87	$(p_{11}^2+p_{61}^2)^{1/2}=0.20$	2.92
	[001]	2.71	$p_{44}=0.06$	2.67
[001]	[001]	5.44	$p_{33}=0.08$	0.59
	[100]	2.99	$(p_{44}^2+p_{45}^2)^{1/2}=0.086$	4.08
[010]	[010]	5.87	$(p_{11}^2+p_{61}^2)^{1/2}=0.20$	2.92
	[001]	2.71	$p_{44}=0.06$	2.67
[110]	[110]	5.98	$(p_{11}+p_{12})/2+p_{66}=0.036$	0.09
	[001]	2.97	$p_{61}=0.1$	5.62

Как видно из таблицы для некоторых геометрий Брэгговской дифракции света эффективная фотоупругая константа совпадает с одной из компонент тензора фотоупругости, таких как p_{11} , p_{33} , p_{44} , p_{61} . С помощью этих компонент, а также соотношений и значений скорости акустических волн, приведенных в таблице, были определены следующие значения упругих и фотоупругих постоянных кристаллов молибдата кальция: $c_{11}=14,4 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $c_{12}=6,5 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $c_{13}=4,5 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $c_{16}=1,4 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $c_{33}=12,6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $c_{44}=3,69 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$,

$c_{66}=4,61 \cdot 10^{10}$ Н/м², $p_{11}=0.17$, $p_{12}=-0.15$, $p_{33}=0.08$, $p_{44}=0.06$, $p_{45}=0.062$, $p_{61}=0.1$, $p_{66}=0.026$. Дополнительные величины для расчета, брались из литературы.

Полученные величины использовались для выявления анизотропии эффективной упругой константы и коэффициента акустооптического качества в кристаллах молибдата кальция при изменении направления распространения продольных акустических волн в плоскости (001). Для этого были найдены компоненты вектора поляризации этих волн γ_k , из системы уравнений Грина–Кристоффеля (4) и определена зависимость скорости и эффективной упругой постоянной от направления волнового вектора для продольных волн в плоскости (001) в кристаллах CaMoO₄. Соответствующая пространственная анизотропия эффективной упругой постоянной в рассмотренной плоскости представлена на рисунке 4 (а). Видно, что значение $c_{\text{эфф}}$ достигает максимального значения при распространении продольной акустической волны под углами 26 и 116 градусов к оси [100], и составляет величину $16.1 \cdot 10^{10}$ Н/м².

При помощи выражений (1) и (3) была рассчитана анизотропия коэффициента акустооптического качества M_2 в этой же плоскости, для случая дифракции света на продольных акустических волнах. Полученные зависимости в относительных единицах представлены на рисунке 4 (б).

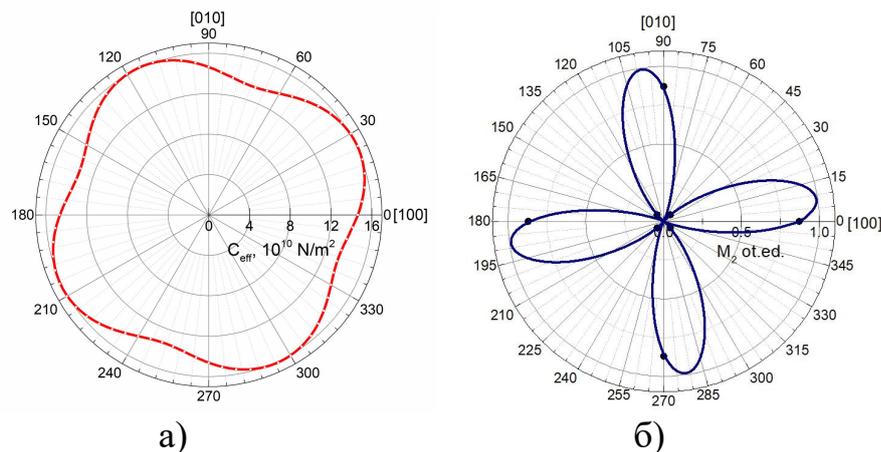


Рис.4. Зависимость эффективной упругой постоянной (а) и коэффициента качества M_2 (б) от направления волнового вектора продольной акустической волны в плоскости (001) в кристаллах CaMoO₄.

Из рисунка 4б видно, что коэффициент M_2 достигает наибольшего значения при направлении волнового вектора продольных акустических волн, под углами 5 и 95 градусов к оси [100] в плоскости (001). При этом значение коэффициента M_2 равно $2.92 \cdot 10^{-15}$ с³/кг, что значительно меньше максимальных значений этого коэффициента в кристаллах молибдата свинца. Затем, аналогично была определена зависимость скорости и эффективной упругой постоянной от направления волнового вектора поперечных волн в плоскости (001) в кристаллах CaMoO₄. Результаты расчета приведены на рис. 5а.

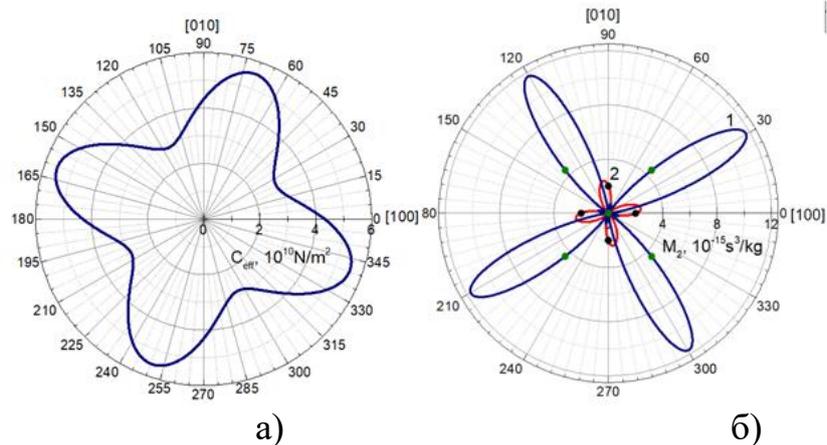


Рис. 5. Зависимость эффективной упругой константы (а) и коэффициента акустооптического качества M_2 (б) от направления волнового вектора поперечных (1) и продольных (2) волн в плоскости (001) в кристаллах CaMoO_4 .

Используя полученные выше результаты и выражения (4) и (5) была рассчитана также анизотропия коэффициента акустооптического качества M_2 в этой же плоскости, при дифракции света на поперечных акустических волнах. Результаты представлены на рис. 5б, где для сравнения приведена анизотропия в случае дифракции света на продольных волнах.

Из рисунка 5а видно, что для поперечных волн $c_{\text{эфф}}$ достигает максимального или минимального значения при распространении акустической волны вдоль продольных нормалей, когда волна является чисто поперечной.

При этом эти значения равны, соответственно, $5.58 \cdot 10^{10} \text{Н/м}^2$ и $2.85 \cdot 10^{10} \text{Н/м}^2$. Из рисунка 5б видно, что максимальное значение коэффициента акустооптического качества M_2 для дифракции света на поперечных волнах более чем в 6 раз больше, чем для дифракции на продольных волнах. При этом наибольшие значения M_2 имеют место при направлении волнового вектора поперечных акустических волн, под углами примерно 30 и 120 градусов к оси [100] в плоскости (001), что близко к направлениям продольных нормалей.

В четвертой главе «Анизотропия акустооптических свойств кристаллов германата висмута и силиката висмута», в первом разделе приведены результаты рассмотрения особенностей акустооптического взаимодействия в нецентросимметричных кристаллах в следствие влияния пьезо- и электрооптического эффектов, в частности в кристаллах германата и силиката висмута. Нецентросимметричные кристаллы обладают пьезоэффектом и в них под действием деформации, вызываемой пьезоактивной акустической волной, может возникать продольное электрическое поле:

$$E_n = - \frac{e_{mkl} \kappa_m \kappa_l}{\varepsilon_{mn} \kappa_m \kappa_n} u_{kn}, \quad (7)$$

где κ_m – направляющие косинусы волнового вектора акустической волны. Это электрическое поле E_k в кристалле за счет электрооптического эффекта изменяет поляризационные константы α_{ik}

$$\Delta \alpha_{ij} = r_{ijk} E_k + R_{ijkl} E_k E_l, \quad (8)$$

где r_{ijk} - тензор электрооптических коэффициентов, а R_{ijkl} - тензор коэффициентов Керра. Таким образом, за счет последовательного действия пьезоэлектрического и электрооптического эффектов возникает "косвенный" или "индуцированный" фотоупругий эффект, который дает вклад в фотоупругость кристалла. С учетом совместного влияния пьезо- и электрооптического эффектов и пренебрегая в (8) коэффициентами R_{ijkl} по сравнению с коэффициентами r_{ijk} , из (7) и (8), получаем:

$$\Delta\alpha_{ij} = \left[p_{ijkl} - \frac{r_{ijl} \cdot \kappa_l \kappa_m \cdot e_{mkl}}{\varepsilon_{mn} \cdot \kappa_m \kappa_n} \right] \frac{\partial U_k}{\partial x_l} = \left[p_{ijkl} - \Delta p_{ijkl}^{инд} \right] \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \quad (9)$$

Индукцированный фотоупругий эффект, как и прямой, описывается тензором четвертого ранга, является функцией волнового вектора акустической волны, но имеет симметрию отличную от прямого эффекта, чаще всего более низкую.

$$\Delta p_{ijkl}^{инд} = \frac{r_{ijl} \kappa_l \kappa_m e_{mkl}}{\varepsilon_{mn} \kappa_m \kappa_n} \quad (10)$$

В ряде случаев $\left| \Delta p_{ijkl}^{инд} \right| \gg \left| p_{ijkl} \right|$, следовательно, $\Delta p_{ijkl}^{инд}$ может определять не только величину, но и знак эффективной фотоупругой постоянной, в результате чего эффективное значение фотоупругого тензора $p_{эфф}$ в нецентросимметричных кристаллах зависит и от направления распространения, и от поляризации акустической волны в кристалле. Следовательно, в общем случае выражение для эффективной фотоупругой константы необходимо записывать в виде:

$$p_{эфф} = p_{ijkl} \alpha_i \beta_j \gamma_k \kappa_l - \Delta p_{ijkl} \alpha_i \beta_j \gamma_k \kappa_l. \quad (11)$$

Кроме того, учет оптической активности приводит к тому, что направляющие косинусы дифрагированного света α_i по мере распространения света определяются с помощью усреднённых (после интегрирования) выражений:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\varphi + 0.5\delta d) \quad (12)$$

$$\alpha_3 = \sin(\varphi + 0.5\delta d), \quad (13)$$

Таким образом $p_{эфф}$ является сверткой значений всех независимых фотоупругих постоянных рассматриваемого кристалла по нормированным векторам поляризации падающего и дифрагированного света α и β , а также волновой нормали и вектора поляризации акустической волны κ и γ .

Во втором разделе четвертой главы рассмотрены результаты исследования анизотропии скорости акустических волн коэффициента акустооптического качества в кристаллах германата висмута. Эти кристаллы имеют низкие скорости продольных и поперечных акустических волн при высокой плотности материала, вследствие чего они могут обладать высоким

коэффициентом акустооптического качества. При этом направление вектора акустической волны, распространяющейся в кристалле германата висмута, изменялось в плоскости (110) относительно оси [110].

Зависимости коэффициента M_2 в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ от направления волнового вектора продольных и поперечных акустических волн в плоскости (110) представлены на рис. 6. Видно, что наблюдается сильная анизотропия акустооптической добротности, особенно для дифракции на поперечных волнах. Максимальное значение M_2 при дифракции на продольных волнах составляет $9,72 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, а для поперечных волн - $1,68 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$. Полученные результаты указывают на необходимость учета закономерностей в анизотропии коэффициента M_2 при использовании кристаллов германата висмута в качестве активной среды акустооптических модуляторов и дефлекторов света

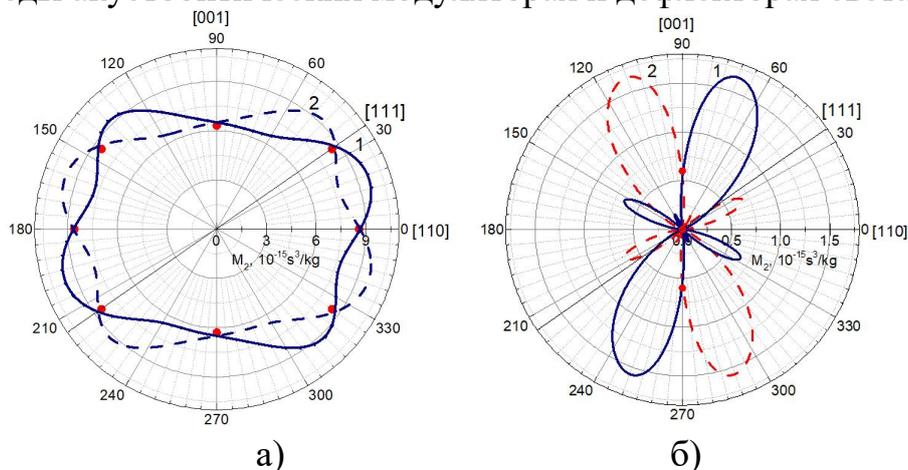


Рис.6. Зависимость коэффициента M_2 в кристаллах ВГО от волнового вектора \mathbf{q} продольных (а) и поперечных (б) волн в плоскости (110), при поляризации света перпендикулярно (1) и параллельно (2) вектору \mathbf{q} .

Во третьем разделе четвертой главы рассмотрены результаты изучения анизотропии скорости акустических волн и коэффициента акустооптического качества в кристаллах силиката висмута. Исследования проведены для случая, когда направление акустической волны, распространяющейся в кристалле силиката висмута, изменялось в плоскости (110) относительно оси [110]. Результаты измерений и расчета фотоупругих констант приведены в таблице 3, в которой через векторы \mathbf{q} , $\boldsymbol{\gamma}$, \mathbf{k} , $\boldsymbol{\beta}$, $\boldsymbol{\alpha}$ обозначены направления, соответственно, волновых векторов звука и света и поляризации звука и падающего и дифрагированного света. Из таблицы 3 видно, что для света, дифрагированного на продольной акустической волне и поляризованного вдоль оси [100], пьезоэлектрооптическая добавка $\Delta p_{эфф}$ равна нулю. При этом при дифракции света на поперечных акустических волнах вдоль оси [110], получаем следующее соотношение для эффективной фотоупругой константы с учетом пьезоэлектрооптической добавки $\Delta p_{эфф}$:

$$\left| p_{эфф} \right| = \left| p_{44} - \frac{r_{41}e_{14}}{4 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}} \right|, \quad (14)$$

Таблица 3

Эффективные фотоупругие константы кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ с учетом вклада пьезо- и электрооптического эффектов

\mathbf{q}	γ	\mathbf{k}	β	α	$p_{эфф}^P$	$\Delta p_{эфф}$	$p_{эфф}^E$	$M_2, 10^{-15}, \text{с}^3/\text{кг}$
[100]	[100]	[010]	[100]	[100]	p_{11}	0	0.16	14.3
	[001]	[010]	[100]	[001]	p_{44}	0	0.04	11.3
[110]	[110]	[001]	[110]	[110]	$1/4(2p_{11}+p_{21}+p_{12})+p_{44}$	0	0.18	25.2
	[1 $\bar{1}$ 0]	[001]	[110]	[110]	$1/4(p_{21}-p_{12})$	0	≤ 0.01	2.25
	[001]	[1 $\bar{1}$ 0]	[110]	[001]	p_{44}	$\frac{r_{41} \cdot e_{14}}{4 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}}$	0.036	3.11
[111]	[111]	[100]	[111]	[111]	$1/3(p_{11}+p_{21}+p_{12}+4p_{44})$	$\frac{4 \cdot r_{41} \cdot e_{14}}{3 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}}$	0.17	24.3
	[1 $\bar{1}$ 0]	[110]	[111]	[1 $\bar{1}$ 0]	$1/6(2p_{11}-p_{21}-p_{12}+2p_{44})$	0	0.025	1.98

В то же время при дифракции света с поляризацией по [111] на продольной акустической волны вдоль оси [111] получаем:

$$|p_{эфф}| = \left| 1/3(p_{11} + p_{12} + p_{21} + 4p_{44}) - \frac{4 \cdot r_{41} e_{14}}{3 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}} \right|, \quad (15)$$

так как пьезо- электрооптические добавки Δp_{11} , Δp_{12} и Δp_{21} в этой геометрии равны нулю. В (14) и (15) $e_{\alpha\beta}$, $r_{\alpha\beta}$ и $\epsilon_{\alpha\beta}$ - компоненты, соответственно, пьезоэлектрического, электрооптического и диэлектрического тензоров, в матричной записи. Полученные значения эффективных фотоупругих констант и скорости акустических волн использовались для расчета зависимости коэффициента акустооптического качества от направления волнового вектора акустической волны в плоскости (110) с помощью выражений (1) и (15). Результаты расчета для случаев, когда поляризации падающего света параллельна (штриховая линия) или перпендикулярна (сплошная линия) волновому вектору акустической волны с учетом оптической активности и выражений (12) и (13) представлены на рис. 7.

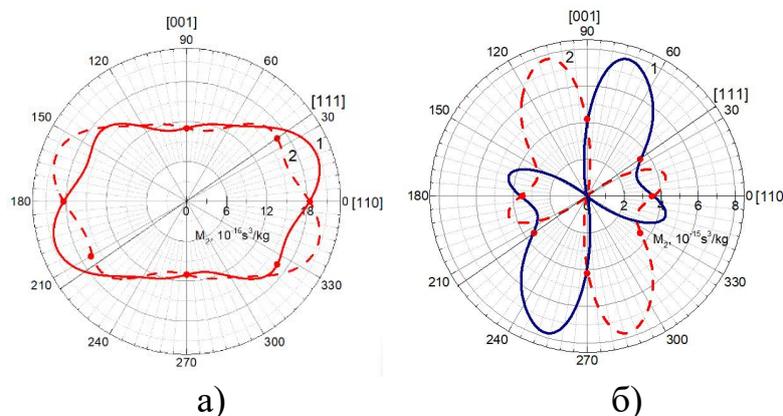


Рис. 7. Зависимость коэффициента M_2 в кристаллах BSO от волнового вектора \mathbf{q} продольных (а) и поперечных (б) волн в плоскости (110), при поляризации света перпендикулярно (1) и параллельно (2) вектору \mathbf{q} .

Из рисунков 6 и 7 видно, что в кристаллах германата висмута и силиката висмута при Брэгговской дифракции света на продольных акустических волнах в плоскости (110) максимальное значение акустооптической добротности M_2 , с учетом пьезоэлектрооптической добавки и оптической активности в них, наблюдается для направлений под углами 20^0 (при перпендикулярной поляризации падающего света) и 160^0 (при параллельной поляризации) градусов к оси [110]. Эти значения составляют $20,7 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ для продольных волн и $7,83 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ для поперечных волн в кристаллах BSO, которые близки к значениям M_2 для продольных волн в наиболее акустооптически добротных кристаллах, таких как PbMoO_4 ($26 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$) и TeO_2 ($34 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$).

Таким образом результаты исследования Брэгговской дифракции света на акустических волнах в нецентросимметричных кристаллах показывают необходимость учета влияния дополнительного вклада, обусловленного пьезо- и электрооптическими эффектами в акустооптическую эффективность таких кристаллов. Этот вклад вносит изменения в анизотропию их фотоупругих свойств и должен учитываться при разработке акустооптических устройств с применением этих кристаллов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы по результатам исследований, проведенных по диссертационной теме: «Закономерности анизотропии акустооптических свойств в кристаллах PbMoO_4 , CaMoO_4 , $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ » можно сформулировать следующим образом:

1. Определены все независимые компоненты тензоров упругости и фотоупругости для кристаллов молибдата свинца, молибдата кальция и силиката и германата висмута (c_{11} , c_{12} , c_{13} , c_{16} , c_{33} , c_{44} , c_{66} и p_{11} , p_{12} , p_{13} , p_{16} , p_{33} , p_{44} , p_{45} , p_{66});
2. Установлена закономерность изменения скорости акустических волн и эффективных упругих констант в исследованных кристаллах, от направления распространения акустических волн в кристаллофизических плоскостях (100) и (110) с учетом влияния пьезоэффекта;
3. На основе полученных выражений для эффективных фотоупругих констант, показано, что наибольшая анизотропия коэффициента акустооптического качества M_2 в кристаллах молибдата свинца наблюдается при дифракции света с поляризацией, перпендикулярной волновому вектору акустических волн в плоскости (001). При этом этот коэффициент M_2 имеет наибольшее и наименьшие значения ($34,7 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ и $14,5 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$) при распространении акустических волн вдоль продольных нормалей;
4. Впервые установлено, что в кристаллах молибдата кальция при дифракции света на чистоперечных акустических волнах вдоль продольных нормалей, максимальное значение коэффициента акустооптического качества M_2 на порядок больше ($12 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$), чем при дифракции на продольных волнах ($2 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$) и сравнимо со значениями этого коэффициента M_2 в наиболее акустооптически добротных кристаллах как PbMoO_4 и TeO_2 .

5. Выявлена закономерность, что в кристаллах PbMoO_4 с примесью неодима коэффициент акустооптического качества сильно зависит от направления поляризации падающего света (в 1.5 раза), что позволяет легко управлять эффективностью Брэгговской дифракции света;
6. Впервые установлено, что в кристаллах германата висмута и силиката висмута в случае дифракции света на пьезоактивных акустических волнах, индуцированный фотоупругий эффект зависит от направления распространения и поляризации акустической волны в кристалле, и сильно влияет на характер анизотропии коэффициента акустооптического качества.
7. Исследование влияния индуцированного пьезо- и электрооптического эффектов и оптической активности на эффективность Брэгговской дифракции света в кристаллах германата и силиката висмута выявило увеличение интенсивности дифрагированного света примерно на 25%.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF ION-PLASMA AND
LASER TECHNOLOGIES**

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

ELBOEVA MOKHINUR IMOMNAZAR KIZI

**REGULARITIES OF ANISOTROPY OF ACOUSTO-OPTICAL
PROPERTIES OF PbMoO_4 , CaMoO_4 , $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ AND $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ CRYSTALS**

01.04.03 – Molecular physics and thermal physics

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent – 2025

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2025.1.PhD/FM1121.

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

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been posted on the website of the Scientific Council (www.iplt.uz) and on Information-educational portal "Ziyonet" information and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor: **Akhmedzhanov Farkhad Rashidovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Official opponents: **Bakhramov Sagdulla Abdullaevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, academic

Kodirov Mumin Kodirovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Leading organization: **Institute of Materials Science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan**

The defense of the dissertation will be held on "14" October 2025 at 14:30 at the meeting of Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, 33 Durmon yuli street. Phone/fax: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the Information Resource Center of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № 15) (Address: 100125, 33, Durmon yuli str., Tashkent, Uzbekistan. Phone: (+99871) 262-31-69).

The abstract of dissertation was distributed on « 02 » October 2025
(Registry record No. 15 dated « 02 » October 2025)



Kh.B. Ashurov
Chairman of scientific council on award of scientific degrees, Doctor of Technical Science, professor

I.D. Yadgarov
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

U.K. Makhmanov
Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees, Doctor of physical and mathematical sciences, professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the resarch is to determine the anisotropy of acousto-optic properties in PbMoO_4 , CaMoO_4 , $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, and $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals.

The tasks of the research:

determination of all independent elastic and photoelastic constants in crystals of lead and calcium molybdate and bismuth germanate and silicate using Bragg diffraction of light in acoustic waves;

study of the anisotropy of the acoustic wave velocity and effective photoelastic constants in crystals of lead and calcium molybdate and bismuth germanate and silicate, taking into account the effect of the piezoelectric effect for the most important crystallographic planes from the point of view of practical application;

generation of expressions for effective photoelastic constants, which allow determining the dependence of the acousto-optic quality factor on the direction in the studied crystals;

evaluation of the effect of the neodymium addition on the value and anisotropy of the acousto-optic quality factor in PbMoO_4 crystals;

evaluation of the optical activity and the effect of piezo and electro-optic effects on the value and anisotropy of the acousto-optic quality factor in crystals of bismuth germanate and silicate.

The object of research are crystals of lead and calcium molybdate, bismuth germanate and silicate.

The subject of research is the variation of the effective elastic and photoelastic parameters, as well as the acousto-optic figure of merit of lead molybdate, calcium molybdate, bismuth germanate, and bismuth silicate crystals with respect to the wave vector direction.

Research methods: X-ray diffraction (XRD) and Raman spectroscopy analyses were performed to determine the monocrystallinity and crystal structural properties, dimensions, deformations, and structural information. Acousto-optic methods were used to determine the acoustic wave velocity in crystals, and a modified Dixon-Cohen method was used to determine the effective photoelastic constants of materials.

The scientific novelty of the research is as follows:

For the first time, the anisotropy of the effective elastic constants for acoustic waves propagating in the (100) and (001) planes in lead molybdenum and calcium molybdenum crystals was determined, and their effect on the change in the acousto-optic quality factor in these crystals was studied;

when pure transverse acoustic waves are diffracted in longitudinal normal directions in calcium molybdenum crystals, the maximum value of the acousto-optic quality factor M_2 ($12 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$) was determined to be 6 times larger than the diffraction in longitudinal waves ($2 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$), and it was shown that this value is comparable to the value of crystals with high acousto-optic quality, such as PbMoO_4 and TeO_2 ;

for the first time, equations were obtained for determining the effective photoelastic constants and acousto-optic quality factor in bismuth germanate and

bismuth silicate crystals, taking into account the contribution of piezo- and electro-optic effects and optical activity;

in the presence of a neodymium additive in lead molybdate crystals, a decrease in the effective photoelastic constant by 1.5 times was observed, which was explained by the fact that the high mobility of neodymium ions in the PbMoO_4 crystal lattice partially reduces the photoelastic effect during the interaction of an acoustic wave and light;

as a result of taking into account the piezo- and electro-optic effects and optical activity in bismuth germanate and bismuth silicate crystals, the directions in which the maximum values of the acousto-optic quality factor M_2 are observed were determined, and they were shown to be located at angles of 20° for perpendicular polarization and 160° for parallel polarization relative to the $[110]$ axis.

Implementation of the research results. Based on the results of the research conducted in the dissertation work in order to establish the patterns of anisotropy of acousto-optic properties in lead molybdate, calcium molybdate and germanate and silicate crystals, the following results were implemented:

The obtained results of scientific research were used in the implementation of the applied project UZB-Ind-2021-78 on the topic "Thermoelectric properties of silicates doped with metal oxides and self-organization processes" carried out at the Photonics Department of the Physics Faculty of the Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan. In particular, the share of piezo and electro-optical effects and the components of the photoelasticity tensor in bismuth silicate crystals were used (Letter of the National University of Uzbekistan No. 01/11 – 3541 dated 12.03.2025). The use of the results made it possible to explain how the optical and piezoelectric properties of doped silicates change under mechanical influence;

the theoretical part of the results of the dissertation work, obtained in the study of the anisotropy of acousto-optic interaction in lead molybdate crystals, were used within the framework of project No. 413100036, supported by the Fundamental Research Fund of the Institute of Technological Sciences, Wuhan University (China). (The Letter from the Institute of Technological Sciences, Wuhan University, Wuhan city, China - November 18, 2024). The results obtained made it possible to find effective cross sections in tetragonal and cubic crystals and to characterize Bragg diffraction under the influence of acoustic waves;

the results published by the author in the "Ultrasonics" journal have been referenced and utilized by foreign researchers in their scientific studies (Optical Materials, 2024, Vol. 148, 114880; Optical Materials, 2024, Vol. 157, Part 2, 116320; RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, 2024, Vol. 16, No. 7, pp. 837–846). These findings have enabled the interpretation of acousto-optic interactions in ammonium fluoroberyllate crystals involving piezo-optic and elasto-optic effects, the analysis of the piezo-optic properties of Rb_2SO_4 crystals, as well as the modeling of acoustic influence on silicon waveguide microstructures.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation work consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of used literature. The volume of the dissertation is 112 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim(I часть, Part I)

- 1A Akhmedzhanov F.R., Elboeva M.I., Mirzaev S.Z. Exploring of Anisotropy of Acousto-Optic Interaction in Lead Molybdate Crystals // Ultrasonics 137 (2024) 107203 <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2023.107203>. (Q1, IF=4.1)
- 2A Akhmedzhanov F.R., Elboeva M.I. Bragg Diffraction of Light by Piezoactive Acoustic Waves in Bismuth Germanate and Silicate Crystals // RENSIT: Radioelektronika, nanosistemy, informacionnye tehnologii, 2025, 17(1):77-82. <https://doi.org/10.17725/j.rensit.2025.17.077>. (Q4, IF=0.6).
- 3A Ахмеджанов Ф.Р., Элбоева М.И. Анизотропия упругих и фотоупругих свойств кристаллов CaMoO_4 // УФЖ, Т.25, Вып.1, 2023, С.21-25.
- 4A Элбоева М.И., Ахмеджанов Ф.Р. Влияние пьезоэффекта на фотоупругие свойства кристаллов силиката висмута // Вестник НУУз, 3/ 2023, С.524-528.
- 5A Ахмеджанов Ф.Р., Элбоева М.И., Солиева Н.М. Анизотропия Брэгговской дифракции света на поперечных акустических волнах в кристаллах силиката висмута // ҚарДУ хабарлари, 5/1(60) 2023, С.22-27.
- 6A Ахмеджанов Ф.Р., Элбоева М.И. Анизотропия акустооптических свойств кристаллов PbMoO_4 // УФЖ, Т.24, Вып.2, 2022, С.124-128.
- 7A Элбоева М.И., Ахмеджанов Ф.Р. Анизотропия акустических и акустооптических свойств кристаллов молибдата свинца // Вестник НУУз, 3/2, 2022, С.502-505.
- 8A Элбоева М.И., Ахмеджанов Ф.Р. Anisotropy of acousto optical properties in PbMoO_4 crystals with neodymium admixture // Вестник НУУз, 3/1, 2024, С. 528-531.
- 9A Elboyeva M.I. Vismut germanati va vismut silikati kristallarida fotoelastiklik va qutblanish orasidagi bog'liqlik // ВухДу ilmiy axboroti, 6/(123) 2025, 170-174b.

II bo'lim (II часть, part II)

- 10A Ахмеджанов Ф.Р., Элбоева М.И. Влияние пьезоэффекта на акустооптическую добротность в кристаллах германата висмута // X международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии», 26-29 март 2024 года, Москва, НИЯУ МИФИ Сборник научных трудов, С. 232.
- 11A Elboeva M.I., Akhmedzhanov F.R. Detection of special orientations in PbMoO_4 crystals for acousto-optical devices // First international conference on low dimensional advanced materials. ICLDAM-24 February 18-19, 2024, Samarkand, 21-22 February, 2024 Tashkent, Uzbekistan. P. 45.
- 12A Elboyeva M.I., Akhmedzhanov F.R. Dependence of Photoelastic Properties of Bismuth Germanate Crystals on Direction of Propagation of Transverse Acoustic Waves // Fizika fanining rivojida iste'dodli yoshlarning o'rni (RIAK-16) Toshkent-2023, 28-29 aprel, pp.46-48.

- 13A Akhmedzhanov F.R., Elboeva M.I. Dependence of photoelastic properties of CaMoO_4 crystals on direction of propagation of transverse acoustic waves // 3^d International Conference on Nanophotonics, Metamaterials and Photovoltaics (ICNMP-2023) 23-28 may, Samarkand, P. 25.
- 14A Элбоева М.И., Ахмеджанов Ф.Р. Влияние пьезоэффекта на фотоупругие свойства кристаллов германата висмута // X Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» APSSP Минск 22-26 мая, 2023 г, С. 354.
- 15A Akhmedzhanov F.R., Elboeva M.I. Influence of Piezo- and Electrooptical Effects on Acousto-Optical Properties of Germanate and Bismuth Silicate Crystals // 25th International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials June 4-9, 2023, Ghent, Belgium, p. 77.
- 16A Akhmedzhanov F. R., Elboeva M.I., Mirzaev S.Z. Photoelastic properties of lead molybdate crystals with paramagnetic impurities of sodium and neodymium // SISM 2 – 6 July, 2023, p. 215.
- 17A Ахмеджанов Ф.Р., Элбоева М.И. Фотоупругие свойства кристаллов молибдата кальция // VIII международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии», Сборник научных трудов, Москва, 2022. с. 198.
- 18A Ахмеджанов Ф.Р., Элбоева М.И. Определение максимальной акустооптической добротности в кристаллах CaMoO_4 // Проблемы фотоники и перспективы развития материалы. Республиканской научно-практической конференции, Ургенч 2022. С.243-244.
- 19A F.R. Akhmedzhanov, M.I. Elboeva, S.Z. Mirzaev. Dependence of acousto-optical properties of PbMoO_4 crystals on direction of wave vector of acoustic waves // 4th IFSA, Frequency & Time Conference (IFTC' 2022), 21-23 September 2022, Corfu, Greece. P. 30-31.
- 20A Ахмеджанов Ф.Р., Элбоева М.И. Фотоупругие свойства кристаллов германата висмута // Проблемы конденсированных сред и технической физики, Республиканская научно-практическая конференция, Самарканд, 25-26 ноября 2022 г, С. 64-65.
- 21A M.I. Elboeva, F.R. Akhmedzhanov. Determination of the acoustooptic quality factor in bismuth germanate crystals // Актуальные проблемы современной физики, Республиканская научно-практическая конференция, Бухара-2022, С. 219-220.
- 22A M.I. Elboeva. $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ kristallarida fotoelastik xossalarning anizotropiya qonuniyatlari // «III renessans yosh olimlari: zamonaviy vazifalar, innovatsiya va istiqbol» xalqaro ilmiy-amaliy anjuman, Toshkent -2024, b.169-171.
- 23A M.I. Elboeva, F.R. Akhmedzhanov. Relationship of group and phase velocities in bismuth germanate crystals // Yosh olimlar va fizik talabalarning IV respublika ilmiy anjumani (ЁОФТРИА- IV) Toshkent -2024, b. 320-321.

Avtoreferat «O‘zMU xabarleri» jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi.

Bichimi 60×84 1/16, “Times New Roman” garniturasida terilgan.
Shartli bosma tabog‘i 3,5. Adadi 30 nusxada.

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi
Kichik bosmaxonasida chop etildi.
100047, Toshkent, akademik Y.G‘ulomov ko‘chasi, 70