

БЕРДАҚ АТЫНДАҒЫ  
ҚАРАҚАЛПАҚ МӘМЛЕКЕТЛИК УНИВЕРСИТЕТИ  
ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАКУЛЬТЕТИ  
УЛЫҰМА ФИЗИКА КАФЕДРАСЫ

физика-математика факультетиниң 4-курс студенти

Изимбетова Замира Сапарбаевнаның  
ПИТКЕРИҰ ҚӘНИГЕЛИК ЖУМЫСЫ

**«КРИСТАЛЛАРДЫ ҲӘМ ЖУҚА ПЛЕНКАЛАРДЫ  
ИЗЕРТЛЕҰДЕ РЕНТГЕНРЕФЛЕКТОМЕТРИЯЛЫҚ  
УСЫЛЛАРЫН ҚОЛЛАНЫҰ»**

Кафедра баслығы

физика-математика илимлериниң кандидаты \_\_\_\_\_ Ж. Акимова

Илимий басшысы

физика-математика илимлериниң кандидаты \_\_\_\_\_ Б.Ж. Нарымбетов

**МАЗМУНЫ**

КИРИСИҰ .....  
ӘДЕБИЙ ОБЗОР .....  
    1. Киши мүйеш дөгерегинде рентген нурларының шағылысыҰы.....  
    2. Жуқа пленкалар хәм олардың қәсийетлери.....  
МЕТОДИКАЛЫҚ БӘЛИМ .....  
    1. Жуқа пленкаларын өсириҰ ұсыллары.....  
    2. Рентгенрефлектометриялық изертлеҰ ұсылы.....  
ТИЙҚАРҒЫ БӘЛИМ .....  
    1. Y-Ba-Cu-O системасы оксидлериниң пленкаларын рентген  
    рефлектометриялық изертлеҰ нәтийжелери.....  
    2. La-Sr-Cu-O бирикпелериниң жуқа пленкаларын изертлеҰ.....  
ЖУҰМАҚЛАҰ .....  
ӘДЕБИЯТЛАР .....

## КИРИСИҰ

Ярым эсир шамасындағы ўақыттан бери ярым өткизгиш жуқа пленкалар физикасы хэм технологиясы заманагөй электронлық техникалардың жетискенликлеринде айрықша орын алмақта. Ярым өткизгиш пленкалардың физикалық қәсийетлерин изертлеўлер жуқа пленкаларда орын алатуғын бир қатар айрықша процесслердиң болып өтетуғынлығын, жуқа пленкаларда физикалық процесслер көлемли материалларға салыстырғанда басқаша болатуғынлықлары анықланды. Сонлықтан кейинги ўақытлары, жуқа пленкаларда табылған айрықшалықлар хэм оларды изертлеўлер жуқа пленкалар физикасының турақлы, өзине тән өзгешеликлерине ийе илимий бағдар ретинде орын алыўына алып келди.

Жуқа пленкалар физикасы хэм технологияларының раўажланыўы микроэлектроника тәрәпинен шешилип атырған мәселелер топламының кеңейиўи арқалы алға илгерилемекте. Олардың бири аса өткизгиш оксидлердиң эпитаксиаллық пленкаларының әмелий қолланыў перспективалары тәрәпинен алға қойылған мәселелер комплекси болып табылады.

Киши мүйеш дөгереклеринде рентген нурларының шағылысыўына тийкарланған рентгенорефлектометриялық изертлеў усылы хәзирги ўақытта қатты денелердиң, жуқа пленкалардың хэм қатламлар арасындағы шегараларының бетин изертлеўлерде кеңнен қолланылады. Рентгенорефлектометриялық изертлеў усылы материаллар бетинен толық сыртқы шағылысыў критикалық мүйеши  $\theta_k$  этирапында рентген нурларының шағылысыў қәбилетин өлшеўлер нәтийжесинде материалдың бетиниң геометриялық хэм физикалық қәсийетлерин анықлаў ушын қолланылыўы мүмкин. Бул питкерий қәнигелик жумысында жоқары температуралы аса өткизгиш оксидлериниң жуқа пленкаларын, хәр қыйлы монокристалл астар материалларын изертлеўде рентгенорефлектометриялық хэм рентгендифракциялық усылларын қолланыў мүмкиншиликлерин үйрениў

тийкарғы мақсет ретінде алға қойылып, жұмыс Бердақ атындағы Қарақалпақ мәмлекетлик университетиниң улыўма физика кафедрасы хәм Өзбекстан Республикасы Илимлер Академиясы Қарақалпақстан бөлиминиң Қарақалпақ тәбият илимлери илим-изертлеў институтының қатты денелер физикасы лабораториясында ислеп шығылды.

## ӘДЕБИЙ ШОЛЫҰ

### 1. Киши мүйеш дөгерегинде рентген нурларының шағылысыуы.

Киши мүйеш дөгереклерінде рентген нурларының шағылысыуына тийкарланған рентгенорефлектометриялық изертлеу усылы хәзирги ўақытта катты денелердің, жука пленкалардың хәм катламлар арасындағы шегараларының бетин изертлеулерде кеңнен қолланылады. Рентген нурларының сыныў коэффициентиниң 1 ден киши болғанлықтан ( $n < 1$ ), критикалық түсиў мүйеши  $\theta_k$  менен шекленген толық сыртқы шағылысыў областының пайда болыуына алып келеди.  $\theta_k$  мәниси изертлениўши нусқаның электрон тығызлығы менен анықланады хәм көпшилик материаллар ушын белгили толқын узынлықлары жағдайларында  $0,5^\circ$  тан жоқары болмайды. Рентген нурларының шағылысыў коэффициенти эксперименталь түрде  $\theta_k$  мүйешине жақын болған мүйешлер аралығында өлшенеди.

Рентген нурлары ушын материалдың комплексли сыныў көрсеткиши төмендегише анықланады:

$$n = 1 - \delta - i\beta,$$

бул жерде ҳақыйқый бөлими болатуғын  $\delta$  – нурдың дисперсиясы менен, ал жорымал бөлиминен туратуғын  $\beta$  – нурдың жутылыуы менен тәрийплениди. Рентген нурлары областында  $\delta$  хәм  $\beta$  киши мәнислерге ийе болады (шама менен  $10^{-4}$  нен  $10^{-8}$  аралығында), хәмде  $\beta$  мәниси  $\delta$  ға салыстырғанда киши болып келеди. Бул параметрлер атомлық шашыратыў факторлары болған  $f_1$  хәм  $f_2$  менен тығыз байланыста:

$$\delta = 4,1516 \times 10^{-4} \times \frac{\rho}{M \cdot E^2} \sum_{j=1}^N C_j \cdot f_{1j}$$

$$\beta = 4,1516 \times 10^{-4} \times \frac{\rho}{M \cdot E^2} \sum_{j=1}^N C_j \cdot f_{2j}$$

Бул жерде  $\rho$  – тығызлықты ( $\text{г} / \text{см}^3$ ),  $E$  – рентген нурының энергиясын (кэВ),  $M - N$  түрлі атомнан тұрыушы бирикпениң молярлық массасы ( $\text{г} / \text{моль}$ ),  $C$  – молекула курамындағы  $j$  түріндеги атомлар саны,  $f_{1j}, f_{2j}$  –  $j$  түріндеги атомның атомлық шашыратуы факторы. Барлық химиялық элементлер ушын, энергияның жутылуы шетинен алыс областларында,  $\delta$  – оң мәниске ийе болып, сыныу көрсеткишиниң хақықый бөлими бирден киши болады хэм сонлықтан рентген нурларының толық шағылысыуы рентген нурларының түсиу мүйеши  $\theta_k = \sqrt{2}\delta$  тең болған толық шағылысыу критикалық мүйешинен киши болған жағдайларында бақланады. Базы бир элементлер ушын жутылуы шетине жақын болған энергияларда  $\delta$  терис мәниске ийе болып, бул жағдайларда хеш кандай нурлардың шағылысыуы бақланбайды.

Рентгенрефлектометриялық изертлеу усылы материаллар бетинен толық сыртқы шағылысыу критикалық мүйеши  $\theta_k$  этирапында рентген нурларының шағылысыу қабилетин өлшеулерге тийкарланған. Бул өлшеулер нәтийжеси материалдың бетиниң геометриялық хэм физикалық қасийетлерин анықлау ушын қолланылуы мүмкин. Рефлектометриялық өлшеулерди өткизиу ушын рентген дифрактометрлери кеңнен қолланылады. Өлшеулер киши мүйешлер аралығында өткерилиуи тийис болғанлығы себепли нурлардың жайылуы монохроматорлар хэм саңлақлар жәрдемінде кемейтиледі.

Рефлектометриялық усылда өлшениуши интенсивлилик иймеклери интеграллық хэм дифференциаллық болып бөлинеди. Интеграллық иймеклерди алыу ушын изертлениуши нуска дифрактометрде рентген нурын ярымынан бөлиуши жағдайында орналастырылады хэм бул жағдай гониометрдиң басланғыш қәдеми береди (ноль точкасы). Буннан кейин, детектор нускаға салыстырғанда еки мәрте артық болған тезлик пенен хәрекетке келтирилип, нускадан шағылысқан нурланыудың мүйешке байланысly интенсивлилигин өлшейди.

Дифференциаллық иймекти өлшеу ушын нуска хэм детектор аралығына нусканың таңланған бир тегисликлер топламына Брэгг мүйешине

сәйкес келиуіші позициясында кристалл-анализатор орнатылады. Детектор арқалы анализатор бурылуы хәрекетинде мүйеш мәнисине байланыслы рентген нурларының инетнсивлиги өлшенеди. Жәнеде бул өлшеулерди, анализатордың қозғалыссыз жағдайында нұсқаны бурыу арқалыда өткеріуге болады.

Интеграллық иймекти өлшегенимизде алдын ала шағылысыу коэффициентиниң өсисиуін, ал соңынан кескин түрде төменлеуін бақлаймыз. Алдыңғы шағылысыу коэффициентиниң өсиуі нұсқа бетине түсиуіші рентген нурларының майданының, нурлардың түсиу мүйеши толық сыртқы шағылысыу мүйешинен киши болғанлығы хәм нурлардың толық шағылысыуы себепли көбейуіне байланыслы болады. Шағылысыу коэффициентиниң кейин ала төменлеуі критикалық мүйеш этирапында басланады хәм шағылысыу коэффициентиниң ярымына тең болған мүйештиң мәниси критикалық мүйешти береді.

Интеграллық хәм дифференциаллық иймеклер көриниси нұсқаның бетиниң микрогеометриясына байланыслы болады. Нұсқаның бетиниң сапасының төменлеуі интеграллық иймеклердиң интенсивлигиниң төменлеуіне, критикалық мүйеш этирапындағы тиклигиниу кемейуіне хәм оның киши мүйешлер тәрәпине жылысыуына алып келеди. Нұсқаның бетиниң гедир-будырлығын характерлеу үшін орташа квадратлық гедир-будырлық бийиклиги  $\sigma$  хәм корреляция узынлығы мәнислери киргизилген. Биринши жақынлауларда шағылысыу коэффициенти  $\sigma$  менен Дебай-Валлер факторы арқалы байланыста болады [1]:

$$R = R_0 \exp\left[-\left(\frac{4\pi\sigma \cos \vartheta}{\lambda}\right)^2\right],$$

бул жерде  $R_0$  – Френель формуласы бойынша есапланылған шағылысыу коэффициенти.

Рефлектометриялық усыллар жәрдемінде бет қатламлары тығызлығын, жуқа пленкалардың тығызлығын хәм олардың қалыңлығын анықлау бул

усылдың материаллардың физикалық характеристикаларын анықлау мүмкіншіліклеринің бир қатары болып есапланады.

Пленка қалыңлықтары жоқарғы хәм төменги шегараларынан шашыратылған рентген нурларының интерференциясы бойынша анықланады. Интеграллық иймеклердің шағылысуы коэффициенті төменлеген областында интерференцияның нәтийжесінде максимумлар хәм минимумлар пайда болады. Интерференциялық максимум саны  $N$  пленка қалыңлығы  $L$  менен төмендеги байланыста болады:

$$N = M + \left(\frac{2L}{\lambda}\right) \cdot (\vartheta_N^2 - \vartheta_{\text{exp}}^2)^{1/2},$$

бул жерде  $M$  – фазалық турақты,  $\theta_N$  – интерференциялық максимумның жайласқан орны.

Пленка қалыңлығы  $N$  ның  $(\vartheta_N^2 - \vartheta_{\text{exp}}^2)^{1/2}$  ден ғәрезлиги тууры сызығының қыяланыуы бойынша табылады.

Рентген нурлары киши мүйешлер жасап кристаллық объектлерге түскен жағдайларда нусқаның бетине перпендикуляр жайласқан кристаллографиялық тегисликлерден дифракциялық шағылысулар орын алыуы мүмкин. Бул жағдайда дифракциялық толқынлар кристаллық астарларға өсирилген пленкалардың кристаллық структурасы хаққында мағлыұматлар бериуи мүмкин.

## 2. Жуқа пленкалар хәм олардың қәсийетлери.

Қырық жылдан аслам ўақыттан бери ярым өткизгиш жуқа пленкалар физикасы хәм технологиясы заманагөй электронлық техникалардың жетискенликлеринде айрықша орын алмақта. Ярым өткизгиш пленкаларды физикалық, электрлик хәм оптикалық қәсийетлерин үйрениулер жуқа пленкаларда орын алатуғын бир қатар айрықша процесслерди көрсетти. Жуқа пленкаларда физикалық процесслер көлемли материалларға салыстырғанда бир қанша өзгеше болып өтеди. Көлемли материалларда онша тәсири билинбейтуғын факторлардың бири – материалдың бетинің тегис

емеслиги (гедир-будырлығы), жуқа пленкалар ушын жүдә әхмийетли рольди ойнайды, оннан пленканың көплеген параметрлери ғәрезли болады. Мысалы, электронлардың пленка бетинен шағылысыў коэффиценти пленканың электр қарсылығы хәмде басқа да кинетикалық характеристикаларына тәсир етеди. Көлемли кристалларда онша билинбес структуралық дефектлер жуқа пленкалардың характеристикаларына, пленкалардың жуқалығы себепли, бираз тәсирин тийдиреди. Сонлықтан кейинги ўақытлары, жуқа пленкаларда табылған айрықшалықлар хәм оларды изертлеўлер жуқа пленкалар физикасының турақлы, басқалардан өзгеше илимий бағдар ретинде орын алыўына алып келди.

Жуқа пленкалар физикасы хәм технологияларының раўажланыўы микроэлектроника тәрепинен шешилип атырған мәселелер топламының кеңейиўи арқалы алға илгерилемекте. Олардың бири аса өткизгиш оксидлердиң эпитаксиаллық пленкаларының әмелий қолланыў перспективалары тәрепинен алға қойылған мәселелер комплекси болып табылады.

Көпшилик аса өткизгишлерди өз ишине алыўшы электронлық әсбаплардың тийкарғы элементи белгили қәсийетлерге ийе болған монокристаллық астарларда өсирилген жоқары сапалы жуқа пленкалар хәм пленкалық структуралар болып табылады. Физика ушын минсиз кристаллық структураларға хәм жоқары электрон тасыўшы қәсийетлерге ийе аса өткизгиш оксидлердиң жоқары сапалы пленкалары жүдә әхмийетли объектлердиң бири, себеби оларда алынған экспериментал нәтийжелер аса өткизгишлик теориясын раўажландырыў ушын әхмийетли болған фундаменталь жуўмақларға ерисиўде үлкен хызмет етеди.

Жоқары температуралы аса өткизгиш материалларды қолланыўдың әхмийетли тәреплери оларда турақлы токларда жойылтыўдың болмаўы хәмде өзгермели токларда жойылтыўдың аз муғдарда болыўы, магнит хәм электромагнит майданларын экранлаў, электромагнитлик сигналларды минимал дәрежеде жаңылысыўлар менен жеткерий мүмкиншиликлери хәм

т.б. қасиетлери. Кейинги ўақытлары аса өткізгіш материалларды хэм оларды ярым өткізгіш материаллар менен бирликте колланыў, олардың тийкарында интеграллық микросхемаларды таярлаўларға үлкен итибар каратылмақта. Ҳәзирги ўақытта аса өткізгішлер тийкарындағы транзисторлар өзлеринин характеристикалары менен ярым өткізгіш материалларға салыстырғанда төменлеў болғаны менен, келешекте жоқары температуралы аса өткізгіш материаллар тийкарындағы интеграл микросхемаларды ислеўде үлкен орын ийелеўи мүмкин екенлиги айқын. Ҳәзирги күнлердиң өзин-ақ пассив аса жоқары жийилик компонентлериниң (фильтрлер, резонаторлар, антенналар, иркиў тармақлары хэм т.б.) биринши үлгилери исленип шығылды хэм олардың ис характеристикалары оларды мобиль радиобайланыс системаларында қолланылыўи мүмкин екенлигин көрсетти.

Аса өткізгішлерди аса жоқары жийилик диапазоны компонентлеринде кеңнен қолланыў келешеге монокристалл астарларда жоқары температуралы аса өткізгіш оксидлериниң жуқа пленкаларын алыў мүмкиншиликлери менен белгиленди. Жоқары температуралы аса өткізгішлер пленкаларының тийкары параметрлери ретинде олардың салыстырмалы қарсылығы хэм магнитлик қабыллаўшылығы көрсетиледи. Пленкалардың жоқары жийиликлердеги қасиетлерин тәриплеўде параметр ретинде бет қарсылығы қолланылады. Феноменологиялық модельлер бойынша жоқары температуралы аса өткізгіш материалларының аса өткізгіш ҳалындағы бет импедансы төмендегише анықланады [2]:

$$Z(t) = R(t) + jX(t) = \frac{\mu_0^2 \omega^2 \sigma_n(t)}{1 + [\omega \mu_0 \sigma_n(t) \lambda_L^2(t)]^2} \cdot \frac{\lambda_L^4(t)}{d} + j \frac{\mu_0 \omega}{1 + [\omega \mu_0 \sigma_n(t) \lambda_L^2(t)]^2} \cdot \frac{\lambda_L^2(t)}{d}$$

$$\sigma_n(t) = \sigma_n(1) \cdot [t^{\gamma-1} + \alpha(1-t^\gamma)]$$

$$\lambda_L^2(t) = \frac{\lambda_L^2(0)}{1-t^\gamma}$$

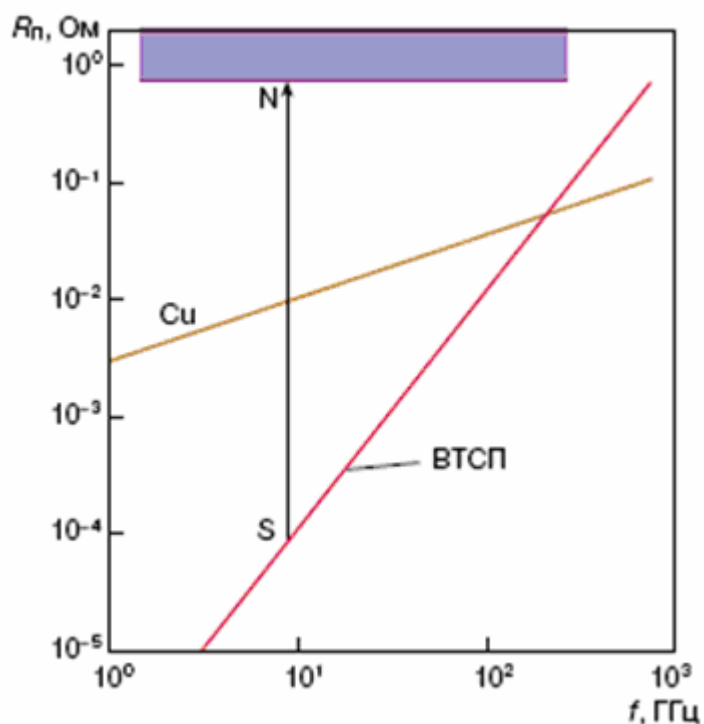
$$\lambda_L^2(0) = 0.12e^{(1.27-0.5\gamma)}$$

$$t = \frac{T}{T_C}$$

бул жерде:  $\lambda_L$  – аса өткизгиш тогиниң ағыўы хәм магнит майданы областьларының шегин билдириўши лондон кириў тереңлиги;  $\lambda_L(0)$  –  $T=0$  К болғандағы лондон кириў тереңлиги;  $T_C$  – аса өткизгишликтен нормаль халына өтиў температурасы;  $\sigma_n(1)$  –  $T_C$  өтиў температурасында тийкарсы заряд тасыўшылардың өткизгишлиги;  $\alpha$  – төмен температураларда бет керими шегин анықлаўшы калдық қарсылығы параметри;  $\gamma$  – пленка сапасын характерлеўши параметр (1.5 – 2.5 аралығындағы мәнислер);  $d$  – пленка калыңлығы;  $\mu_0$  – магнитлик турақлы;  $\omega$  – айланбалы жийилик.

$\gamma$  параметри пленка сапасын билдириўши болып, оның мәниси қанша жоқары болса, соншама бет қарсылығының төмен екенлигин билдиреди. Актив бет қарсылығы жийилик квадратына пропорционал болғаны ушын, жоқары температуралы аса өткизгиш материаллар өзлериниң үстемлилигин 100 .. 200 ГГц жийиликлерине шекем сақлап турады. Буның себеби жоқары температуралы аса өткизгиш материалларында бет қарсылығының басланғыш мәниси әпиўайы металларға салыстырғанда бир неше дәрежеге төмен болыўында. Усының тийкарында олар компакт, жоғалтыўы аз болған аса жоқары жийиликтеги сигналларды жеткерий тармақларын, жоқары ис характеристикаларына ийе, тез хәрекет етиўши санлы интеграл схемаларды пайда етиўге мүмкиншилик жаратады.

Жоқары температуралы аса өткизгиш оксидлердиң ишинде ең көп изертленген материаллар  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  хәм  $Tl_2Ba_2CaCu_2O_x$  жуқа пленкалары болып табылады. Жуқа пленкалардың аса жоқары жийиликтеги қәсийетлерин изертлеўлерлер қанша қыйын болса да, бул материаллар ушын кеңнен изертленип, олардың бет қарсылығының жийиликке байланыслылығы анықланды.  $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$  жуқа пленкасы ушын бул нәтийжелер мыс материалы менен салыстырылған жағдайда 1-сүүретте келтирилген [3].



1-сүўрет.  $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$  жуқа пленкасы хэм мыс материалы ушын аса өткизгиш халында бет қарсылығының жийиликке байланыслы өзгеріуі.

$YBa_2Cu_3O_{7-x}$  хэм  $Tl_2Ba_2CaCu_2O_x$  жуқа пленкаларына болған қызығыўшылықтың тийкары олардың аса өткизгиш халына өтиў температуралары 80-125 К этирапында жайласқан. Олар бир қатар улыўма қәсийетлерге ийе, мысалы, қатламлы структураға, бирдей электр өткизгиш мыс-кислород қатламы тегислиги хэм электр параметрлериниң анизотропиялылығы.

## МЕТОДИКАЛЫҚ БӨЛИМ

### 1. Жуқа пленкаларын өсириу ұсыллары.

Жоқары температуралы аса өткізгішліктің ашылыу ұақтының өзінде ионлық-плазмалық бүркіу, электрон нурлары жәрдемінде термикалық шаңландыруу, молекуляр нурлары эпитаксиясы ұсыллары тийкарларында жуқа пленкалы ярым өткізгішлік микроэлектроника технологиялары раўажланған еди. Бул ұсыллар аса өткізгіш оксидлерди алыу ұшын қолланылып, олардың қурамалы составқа ийе болған жаңа материалларды алыуда жеткиліксіз екенлігін хәм шаңландыруу ұсылларын еле де раўажландыруу керек екенлігін көрсетти. Себеби, хәзирги белгили болған жоқары температуралы аса өткізгішлер көп компонентли анизотропиялық оксидлер болып табылады хәм олардың қәсийетлери, алды менен аса өткізгішлік қәсийетлери, бирикпелердің стехиометриялық составына, кристалл структураларының минсізлігине, кислород подрешеткасының халына байланысly болады.

Соның менен қатар, жоқары сапалы эпитаксиаллық пленкаларды алыу хәм оларды әмелий қолланыуларда дурыс астар материалларын таңлаулар да жүдә әхмийетли орын тутады. Жоқары температуралы аса өткізгішлердің эпитаксиаль пленкаларын алыуда хәм әмелий мәселелерди шешиуде химиялық жақтан инертли, кристалл решеткасы параметрлери пленкалардың кристалл решеткаларының параметрлерине жақын, термикалық исиниу коэффициентли пленка материалына жақын хәм т.б. болған монокристалл материаллар ең қолайлы, идеал астарлар болып табылады. Ең биринши пленкалар  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (сапфир) астарларында өсирилди. Булардың ишинде  $\text{SrTiO}_3$  астарларында өсирилген пленкалар ең жақсы характеристикаларды көрсетти. Бул астарларды таңлау олардың аса өткізгіш оксид пленка материалларына структуралық жақтан жақынлығы хәм химиялық инертлилігине байланысly болды. Усының менен қатар,  $\text{LaAlO}_3$  хәм сапфир астарлары да кеңнен қолланылмақта.  $\text{LaAlO}_3$  өзиниң диэлектрлік синдириушилиги жоқары болғанлықтан, киши өлшемдеги жуқа

пенкаларды алыуға мүмкіншілік беретугын болса, сапфир астарлары өлшеми үлкен болған, жоқары химиялық тұрақтылыққа ийе, жоқары жыллылық өткеріушілік қасиетлерге ийе астар пластиналарын алыуға мүмкіншілік жаратады.

Лазерлік пуўлатыу ұсылы жоқары температуралы аса өткізгіш пенкаларын алыуда кеңнен қолланылады. Оның баслы қасиеті – нызандағы барлық химиялық элементлерди бирдей халда пуўлатыу мүмкіншілиги болып табылады. Температура хәм басымларды дуры таңлау менен жоқары температуралы аса өткізгіш пенкаларын қатламба-қатлам түрде керекли структуралық фазасында өсириуге мүмкіншіліклер жаратады.  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пенкаларының ишіндеги ең жақсылары ұсы ұсыл жәрдемінде өсирилмекте.

Бұл пенкалар монокристалл астарларда өсирилиуі себепли астар материалларының характеристикаларының пенка характеристикаларына тәсир етиуі бақланады. Сонлықтан астар материалларына талаптар, олардың диэлектрлик сиңдириушілигиниң орташа мәніси хәм диэлектрлик жойытылыулардың аз болыуы. Бұл талаптар пенкалардың химиялық жақтан инертли болыуы хәм бетиниң тегис болыуы ұшын зәрүр болып табылады. Усы талаптарды толық қанатландыратугын астарлардың бири  $LaAlO_3$  материалы. Буннан тысқары кеңнен қолынып атырған астар материалы  $MgO$  болып табылады. Хәзирге шекем  $MgO$  астарында ғана еки жақлама қалыңлығы 600 нм, бет карсылығы төмен хәм ис қуўаттылығы жоқары (50 кВт) болған  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пенкалары өсирилди [4].

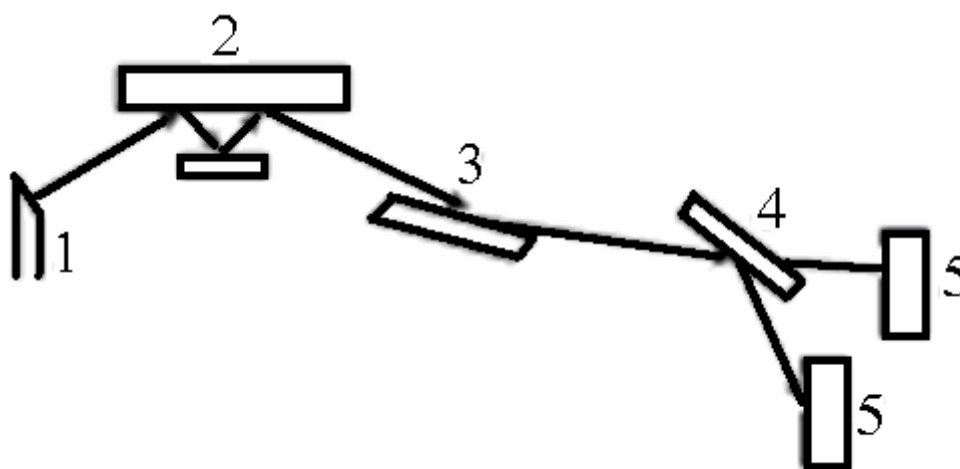
Соның менен бирге хәзирги ўақытта жоқары температуралы аса өткізгіш пенкалар хәм астар материаллар арасындағы кристалл решеткалары параметрлерин, ыссылық кеңейиу коэффициентлерин хәм өз-ара химиялық тәсир етисиулерин бири-бирине сәйкес келтириу ұшын буферлық қатламларды өсириу технологиялары да ислеп шығылды.

## 2. Рентгенрефлектометриялық изертлеу ұсылы.

Рентген рефлектометрияның схемасы 2-сүуретте көрсетілген. Ол жерде стрелкалар менен рентген нурларының жолы корсетілген. Интеграллық иймеклик өлшенген ұақтında кристалл-анализатор қолланылмайды. Рентгенорефлектометриялық интеграллық иймектиң формасы нұсқаның фазалық халынан (аморфлық ямаса кристаллық), ал кристаллық халда болғанында кристалл ориентациясына байланыслы болмайды. Шағылысыу коэффициенті Френель формуласы бойынша анықланады:

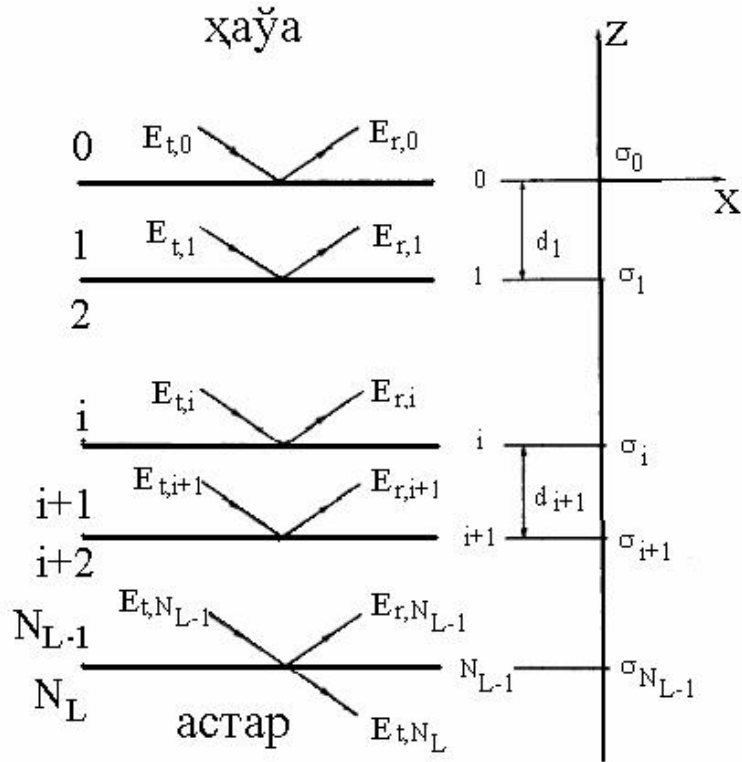
$$R = \left\{ \frac{\sin \theta_1 - [\sin^2 \theta_1 + 2(n-1)]^{1/2}}{\sin \theta_1 + [\sin^2 \theta_1 + 2(n-1)]^{1/2}} \right\}^2,$$

бул жерде  $\theta_1$  – нұсқаға түсіу мүйеши,  $n$  – сыныу көрсеткіши.



2-сүурет. Рентген рефлектометрияның схемасы: 1) – рентген трубкасы, 2) – кристалл-монохроматор, 3) – нұсқа, 4) – кристалл-анализатор, 5) детектор.

Көп қатламлы материаллардан нурлардың шағылысыуы хәм сынып өтиуінің схематикалық көриниси 3 – сүуретте келтирилген. Улыұмаластырылған жағдайда  $j$  қатламының төменги шегарасынан шағылысыу



3-сўрет. Көп қатламлы пленканың схемалық көриниси. Ҳәр бир  $j$ -шы Катлам оның қалыңлығы  $d_j$ , сыныў көрсеткиши  $n_j$  хәм төменги шегарасының гедир-будурлығы  $\sigma_j$  менен анықланады.

амплитудасы  $R_j$  шағылысыўшы  $E_{r,j}$  хәм сынып өтиўши  $E_{t,j}$  электр майданларының амплитудаларының қатнасы арқалы анықланады:

$$R_j = a_j^2 \left( \frac{E_{r,j}}{E_{t,j}} \right),$$

$$a_j = \exp\left(-i \frac{k_j d_j}{2}\right),$$

бул жерде  $j$  – қатлам индекси,  $t$  - өтиўши нурды белгилеўши индекс,  $r$  – шағылысыўшы нурдың белгиси,  $a_j$  – фазалық фактор,  $d_j$  –  $j$  қатламының қалыңлығы,  $k_j$  –  $j$  қатламы ушын толқын векторының  $z$ -компонентасын билдиреди хәм төмендегише анықланады:

$$k_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j \sin \theta_j = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\sin^2 2\theta_0 - 2\delta_j - 2i\beta_j},$$

бул жерде  $n_j = 1 - \delta_j - i\beta_j$   $j$  қатламы үшін сыныў көрсеткіші,  $\theta_0$  – нурдың биринши қатламға түсіў мүйеши. Снеллиус нызамы бойынша:  $n_0 \cos\theta_0 = n_j \cos \theta_j$  хәм қаралып атырған көп қатламлы материаллар үшін «0»-қатлам бул ярым шексиз ҳаўа ямаса вакуум қатламы деп алынса, ал ең кейинги  $N_L$ -қатламда ярым шексиз астар қатламы ретинде қаралады. Рекурсивлик формулаға тийкарланып шағылысыў амплитудасы төмендегише есапланылыўы мүмкин:

$$R_j = a_j^4 \frac{R_{j+1} + r_j}{R_{j+1} \cdot r_j + 1},$$

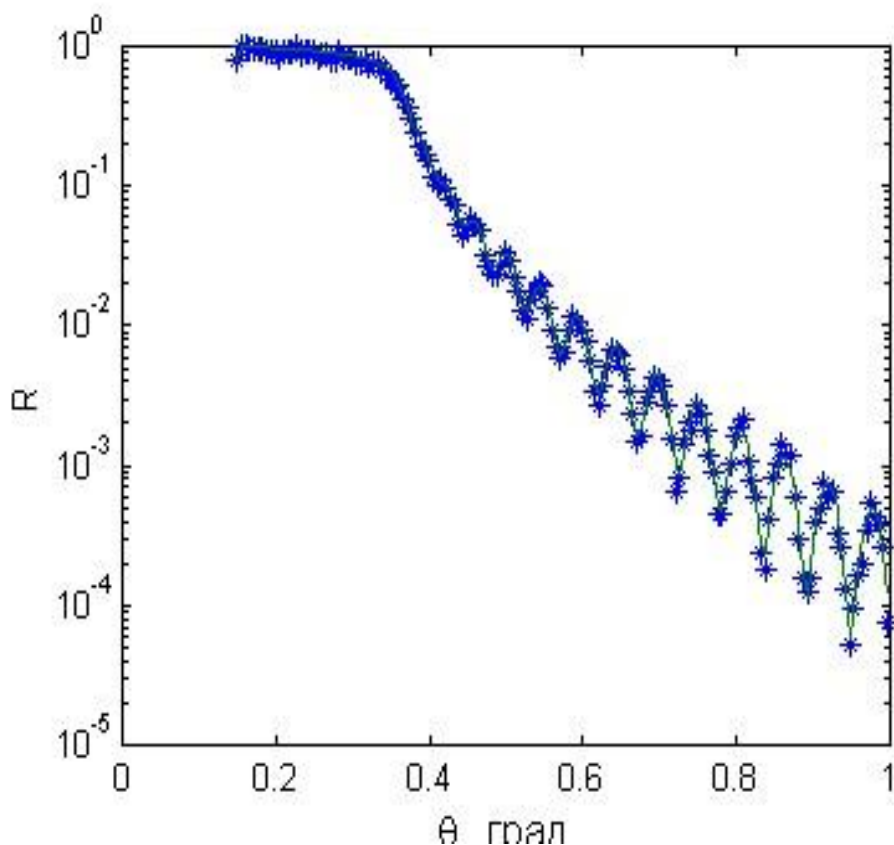
$$r_j = Q_j \frac{k_j - k_{j+1}}{k_j + k_{j+1}},$$

бул жерде  $r_j$  – Френель шағылысыў коэффициенті хәм  $Q_j$  – шегара бетиниң гелир-будырлығын моделлестириўши фактор. Есаплаўлар ең төменги  $N_L$  қатламынан басланып, ол жерде  $R_{N_L}$  нольге тең болаып қабылланады хәм шағылысыў амплитудалары  $R_j$  жоқарыдағы рекурсивлик формула бойынша қалған барлық қатламлар үшін есапланыўы мүмкин. Ақырында шағылысыўшы хәм өтиўши нурлар үшін төмендеги қатнастарға ийе боламыз:

$$R = \frac{I_R}{I_0} = |R_0|^2 = \left| \frac{E_{r,0}}{E_{t,0}} \right|^2,$$

$$T_{N_L} = \left| \frac{E_{t,N_L}}{E_{t,0}} \right|^2.$$

Монокристалл астарға өсирилген пленкадан шағылысыў коэффициентиниң мүйешке байланысly өзгериўиниң типикалық түри 4-сүўретте көрсетилген [5]. Өлшеўлер рентген трубкасының  $\text{CuK}_\alpha$ , кремний кристаллы жәрдемінде монохроматизацияланған нурланыўын қолланыў арқалы рентген рефлектометринде жүргизилген.



4-сүүрет. Айна астарында өсирилген хром пленкасының шағылысуы коэффициентининң мүйешке ғәрезлилиги.

Сүүретте көринип турғанындай, критикалық мүйештен жоқары болған мүйешлерде, периоды пленканың қалыңлығы менен анықланыўшы типикалық осцилляциялар система орын алады. Бул жерде осцилляция периоды пленка қалыңлығының  $d=704 \text{ \AA}$  екенлигин көрсетип, санлы модель иймеги эксперименталлық иймек пенен жүдә жақсы сәйкес келип турғанлығын көриўимизге болады. Және де бир параметрдинң,  $\sigma$  – орташа квадратлық гедир-будырлылықты билдириўши, санлы модель бойынша мәниси  $11 \text{ \AA}$  ге тең болып табылған.

## ТИЙКАРҒЫ БӨЛИМ

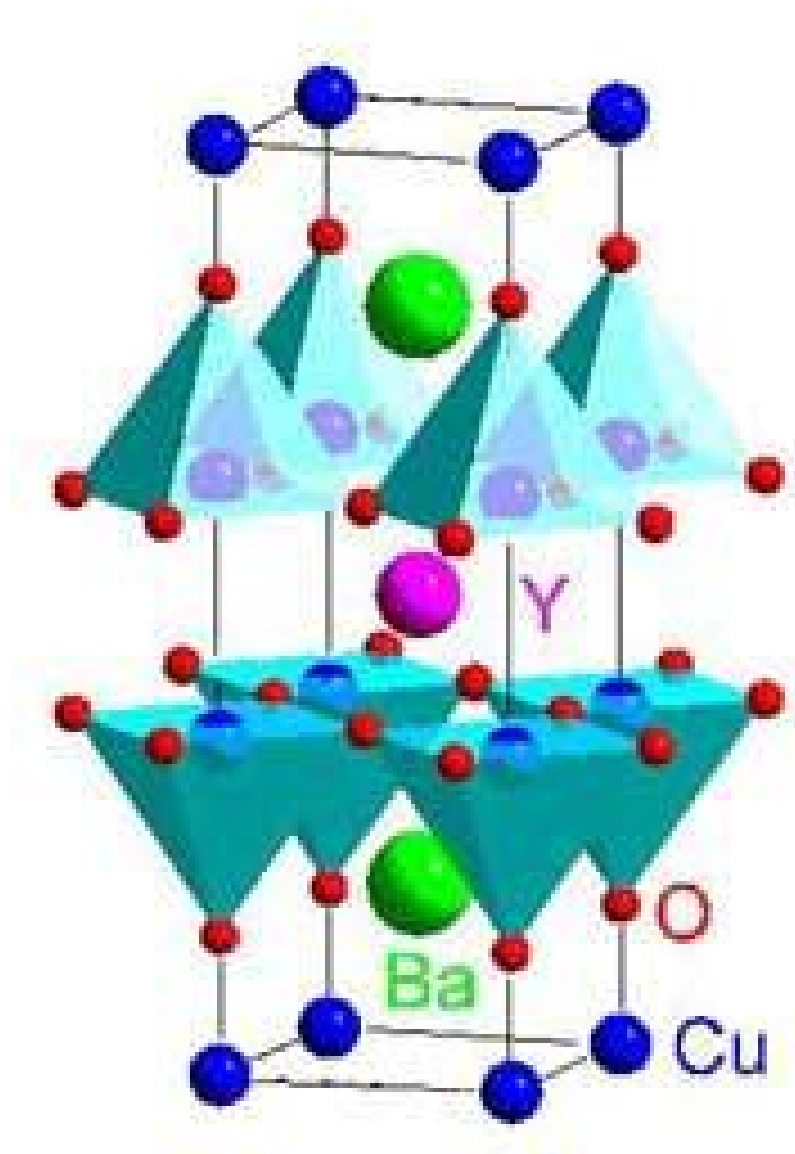
1986 жылы Беднорц хәм Мюллер тәрәпинен мыс, лантан хәм барий оксидлеринен куралған керамикада ( $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ) 30 К температурада аса өткізгіш жағдайына өтиўи табылды [6]. Тез ўақыт аралығында хәр қыйлы составлардағы керамикаларды изертлеўлер нәтийжесинде жаңа металлоксидлик аса өткізгіш материаллары анықланды. 1987 жылы Чу хәм т.б. тәрәпинен иттрий, барий хәм мыс оксидлеринен куралған аса өткізгішлик халына өтиў температурасы 93 К болған  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  керамикасы синтезленди [7]. Бул биринши мәрте суйық азоттың қайнаў температурасынан жоқары температураларда аса өткізгішлик халының ашылыў болды. 1988 жылы Маеда хәм т.б.  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{x-1}\text{Cu}_x\text{O}_{2x+4}$  составындағы курамалар дизимин синтезлеп, олардың ишинде  $x=3$  фазасының критикалық температурасы 108 К екенлигин анықлады [8]. Сол ўақытлары Шенг хәм Херманлар тәрәпинен  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  аса өткізгіш бирикпеси алынып, оның критикалық температурасы 125 К болды [9]. 1993 жылы Антипов, Путилин хәм т.б. тәрәпинен сынап тийкарындағы  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{x-1}\text{Cu}_x\text{O}_{2x+2+d}$  ( $x=1-6$ ), бирикпелер қатары алынды [10,11]. Олардың ишинде  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+d}$  (Hg-1223) бирикпеси усы күнге шекемги нормаль басымда ең жоқары критикалық температураға ийе ( $T_c = 135 \text{ К}$ ), ал сыртқы басымды 350 мың атмосфераға шекем көтергенде оның өтиў температурасы 164 К ға шекем көтерилди [12].

Солай етип хәзирги ўақытқа 50 ден аслам жоқары температуралы аса өткізгіш купратлар анықланды.

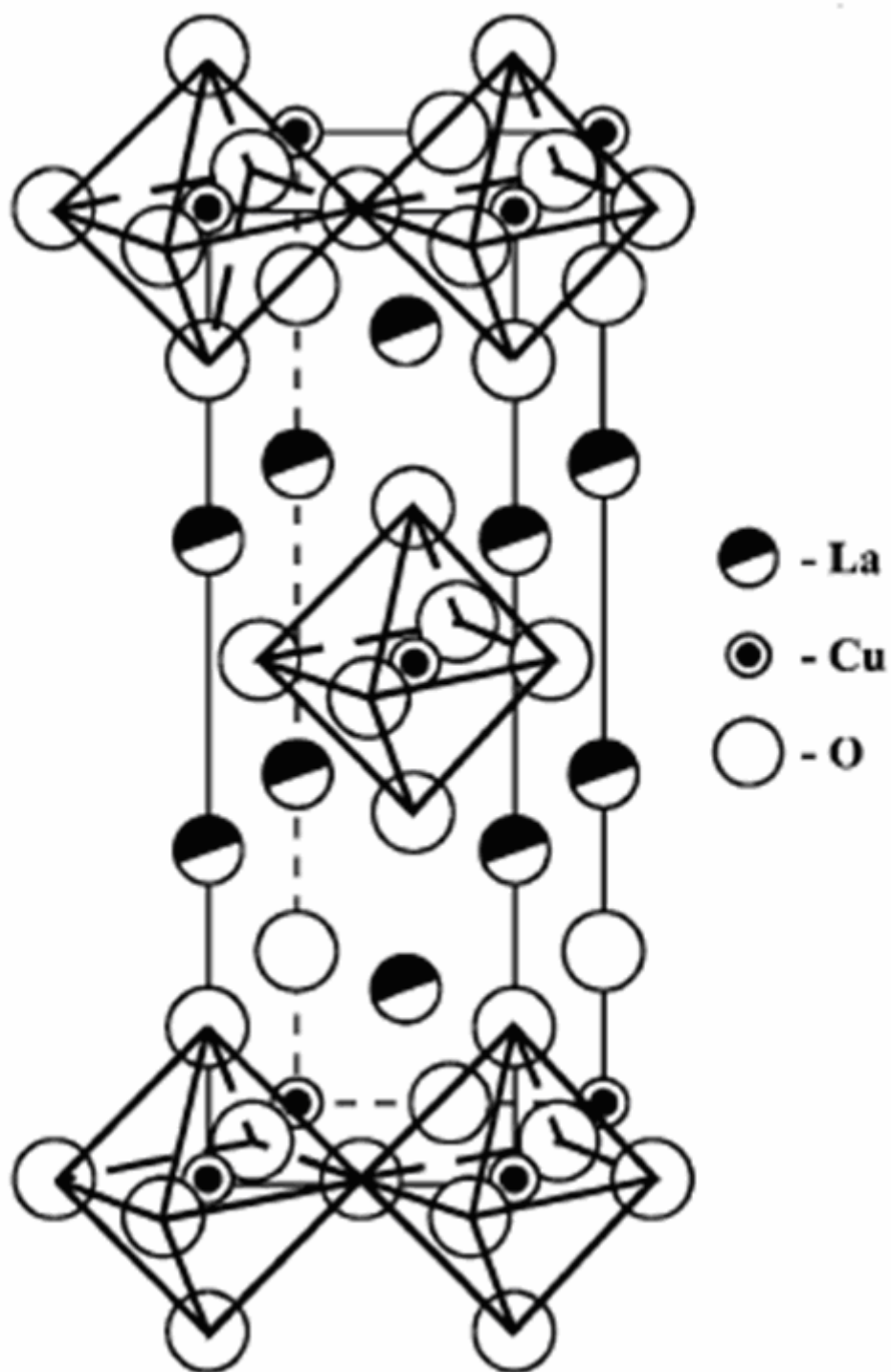
Жоқары температуралы аса өткізгішлердің курамы хәм кристалл курылыслары хаққындағы мағлыўматларды анализлеўлер бир қатар улыўма жуўмақларға алып келди [13-16]. Бириншиден, олардың барлығы мыс тийкарында курамалы оксидлер қабатларынан дүзиліп, хәммеси де кислород атомлары кемис болған перовскит блокларынан куралған. Бул купратларда  $\text{CuO}_2$  мыс-кислород қатламы аса өткізгішликтің тийкарғы себепшиси

есепланады.  $\text{CuO}_2$  қатламында мыс атомлары квадрат сеткаларды пайда етип, усы сетканың түйинлерінде жайласады, ал кислород атомлары болса түйинлерди тутастырыўшы сызықлар бойлап жайласады. Усы қатламда байланыс пайда етиўши мыс атомларының электронлары ( $3d_{x^2+y^2}$ ) хәм кислород атомларының электронлары ( $2p_{xy}$ ) бос халында болып, қатламдағы атомларға тийисли болмайды. Сонлықтан структурасында ( $\text{CuO}_2$ ) қатламларын өз ишине алыўшы бирикпелерде металлық электр өткизгишлик қәсийетлерине ийе болыў мүмкиншиликлери орын алады. Екинши аса өткизгишликтің себепшиси ретінде қабылланған әхмийетли параметрлердиң бири, бул қатламдағы мыс хәм кислород атомлары арасындағы байланыс узынлығы болып есапланады. Ең жақын мыс атомлары арасындағы аралық 3,80-3,94 А болған жағдайларда бул байланыс узынлығы 1,90-1,197 А аралығында болыўы тийис. Мыс атомлары қоңсы қатламлардағы кислород атомлары менен де байланыста болыў мүмкиншилигине ийе, бирақта бул байланыслар 2,20 А нен үлкенирек болып, өз қатлаындағы байланысларға салыстырғанда бир қанша узынырақ болып табылады. Басқаша сөз бенен айтқанда, аса өткизгиш купратлар структураларында бир-биринен айрықша химиялық байланыслар орын алады:  $\text{CuO}_2$  қатлам тегислигинде күшли байланыслар, ал бул тегисликке перпендикуляр бағытта бир қанша әззи байланыслар.

Кристалл структуралар тек ғана бир түрде зарядланған фрагментлерден куралыўы мүмкин емес болғанлықтан ( $\text{CuO}_2$  қатламлары), электронейтраллықты сақлаў максетинде, қатламлар зарядын компенсациялаўшы басқа қатламлардың болыўы зәрүр. Белгили аса өткизгишлердиң көпшилигинде  $\text{CuO}_2$  қатламлары  $\text{BaO}$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{TlO}^+$ ,  $\text{BiO}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Y}^{3+}$  хәм т.б. қатламлар менен гезеклесип, көп қатламлы кристалл структураларын пайда етеди. 5-6 сүүретлерде жоқары температуралы аса өткизгиш купратларының кристалл структураларында қатламлар өз-ара жайласыўлары көрсетилген.



5-сүүрет.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  бирикпесиниң кристалл структурасы ( $T_c = 93 \text{ K}$ ).



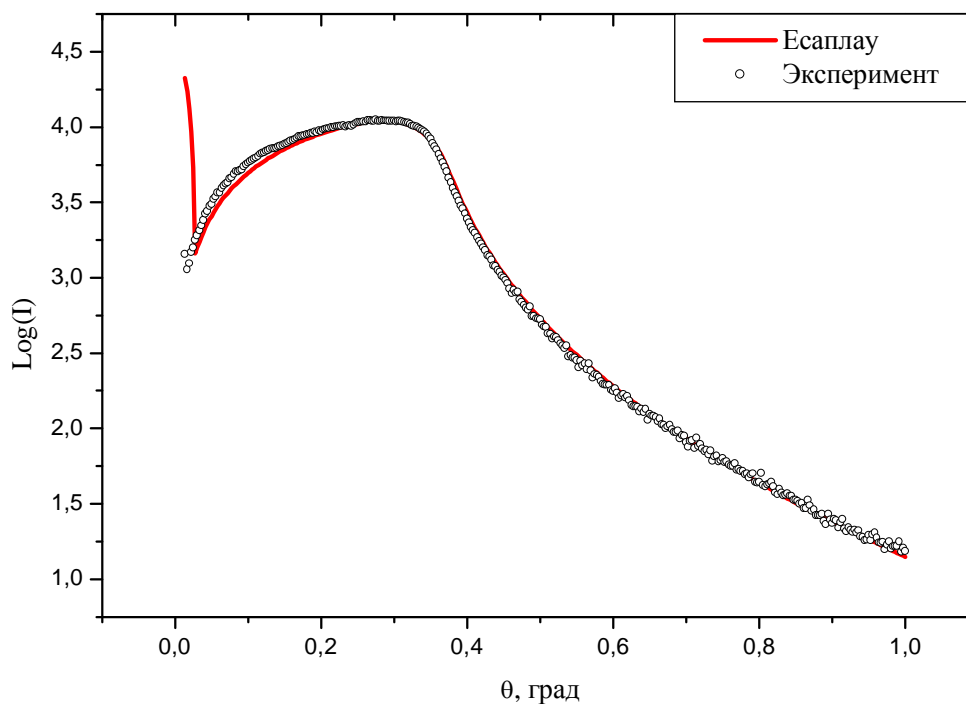
6-сүүрет.  $(\text{La,Sr})_2\text{CuO}_4$  типиндеги кристалл структурасы ( $T_c = 30 \text{ K}$ ).

1. Y-Ba-Cu-O системасы оксидлериниң пленкаларын рентген рефлектометриялық изертлеу нәтийжелери.

Рентгенрефлектометрия усылы жәрдеминде 200 нм қалыңлығындағы  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  хәм 20 нм қалыңлығындағы  $\text{CeO}_2$  пленкалары, хәмде  $\text{NdGaO}_3$  астарларының бетиниң морфологиясының характеристикалары изертленди. Экспериментал жұмыслар рентген дифрактометринде, мыс анодының қолланылыуында, германий монохроматорының 004 шағылысыуы хәм горизонтал бағытта 200 мкм хәм вертикал бағытта 2 мм болған коллиматорлардың қолланылыуында өткерилди. Түсиуши нурдың интенсивлиги  $50 \times 10^3$  имп/с болып, нусқадан шағылысқан нурлар алдында мүйешлик апертуралары 100, 120 хәм 180 мүйешлик минутты қурайтуғын саңлақлар орнатылған детектор менен өлшенди. Рефлектометриялық иймеклер  $\theta/2\theta$ - сканерлеу усылы менен өткерилди, ал диффузлық шашыратылыулар нусқаның  $\omega$ -мүйешинде турақлы түринде орнатылып,  $\theta$ -сканерлеу жолы менен жазып алынды.

7 -сүүретте  $\text{NdGaO}_3$  монокристалл астарының экспериментал хәм теоретикалық шағылысыу иймеклери көрсетилген.  $\theta=0^\circ$  этирапындағы  $0,5I_0$  интенсивлилик максимумы өлшеу схемасына байланыслы болып, ол түсиуши нурды ярымлау методикасынан келип шығады. Бул максимум теоретикалық иймекти нормировкалау хәм нусқаның жайласқан мүйешлик аўхалын контроллау ушын қолланылады.

$I(\theta)$  интенсивлигиниң экспериментал иймеклигиндеги  $\theta_{кр}$  мүйеши этирапында өсиуи  $\text{NdGaO}_3$  астарынан толық сыртқы шағылысыудың критикалық мүйешине сәйкес келеди. Монокристалл нусқалардан алынған эксперименталлық иймеклерди моделлеуде Паррат хәм тағы басқалар тәрәпинен усынылған рекуррентлик қатнастар қолланылып, бул жерде астар материалы ушын хаўа-нусқа шегарасындағы гедир-будырлық орын алған ярым шексиз кристалл модели қаралды.

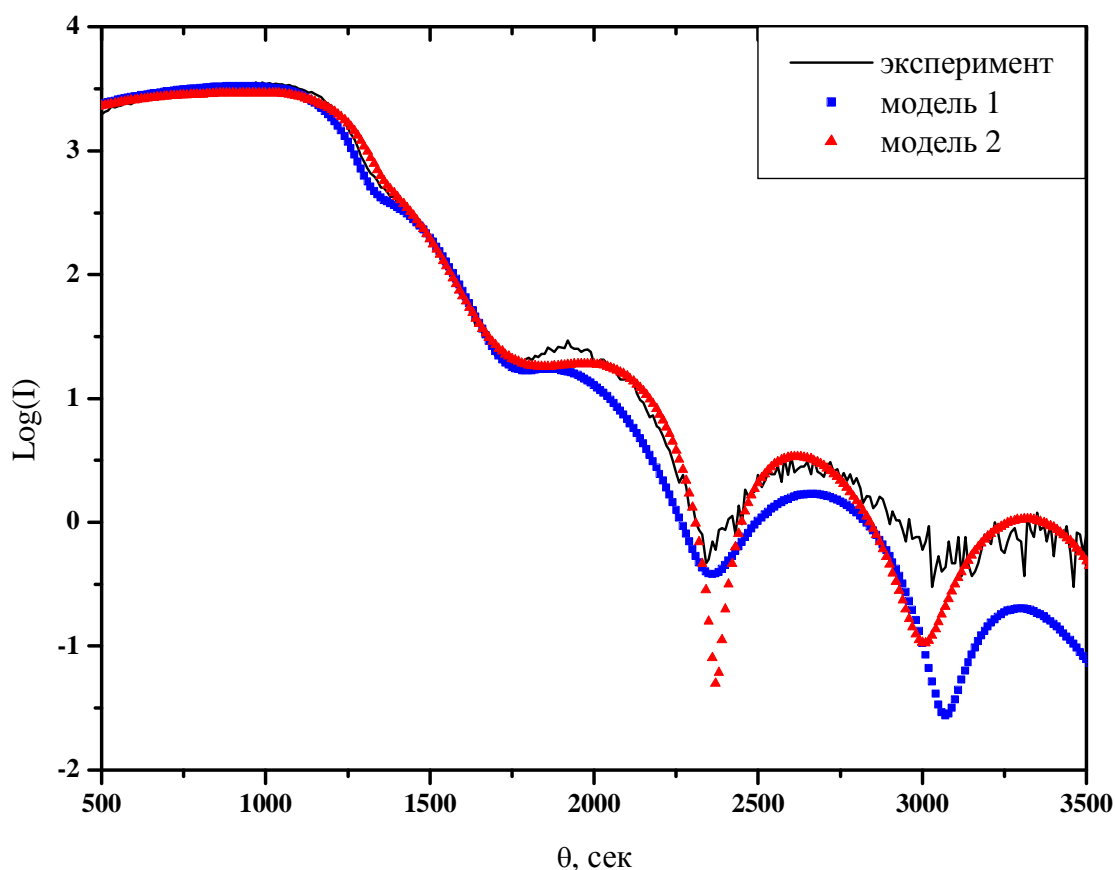


7-сүүрет.  $\text{NdGaO}_3$  монокристалл астарының экспериментал хэм теоретикалык шағылысыў иймеклери.

Шегарадан шағылысыў хэм өтиўдин амплитудалық коэффициентлери ушын Дебай-Валлер факторлары теориялық мәнислерине муўапық есапқа алынды.

Теориялық есаплаў иймеклигин экспериментал иймеклик точкалары менен жақынлатыўда нуска бетиниң гедир-будырлылығы  $\sigma$  хэм инструменталлық қәтеликлер менен байланыслы болған нуска бетиниң нурланыўшы майданы  $S$  мәнислери өзгермели параметрлер ретинде алынды. Эксперименталлық иймеклерди анализлеўдин нәтийжесинде нускалар ушын гедир-будырлық коэффициентини  $\sigma$  0,2 нм ден 0,5 нм ге шекемги аралықларда екенлиги анықланды.

$\text{NdGaO}_3$  астары бетинде өсирилген 20 нм лик  $\text{CeO}_2$  пленкасынан алынған рефлектометриялық иймеклик 8-сүүретте келтирилген.  $\Theta_{\text{кр}}=1291''$  қа тең болған толық сыртқы шағылысыў критикалық мүйешинен үлкен болған мүйешлерде шағылысыў иймеклигинде максимумлар осцилляциясы



8-сүүрет.  $\text{NdGaO}_3$  астары бетинде өсирилген 20 нм лик  $\text{CeO}_2$  пленкасынан алынған экспериментал хэм теоретикалық рефлектметриялық иймекликлер.

көринеди. Бул осцилляциялардың пайда болыуы астар бетинде пленканың бир текли өсиуиниң көрсеткиши болып есапланады. Нурланыўдың пленкада күшли жутылыуына қарамастан шағылысыў иймеклигинде  $1^\circ$  қа шекемги аралықларда осцилляцияларды бақлаўға болады. Шағылысыў сигналының интенсивлигиниң мүйештиң жоқарылауы менен тез төменлеуиниң баслы себеби пленка бетиниң гедир-будырлылығын характерлеўши  $\sigma_1$  коэффициентиниң жоқары мәниси хэмде пленкада нурланыўдың жутылыуы болып есапланады.

Тәсирлендириў теориясының қолланылыуы үлкен мүйешлерде гедир-будырлылықтың киши мәнислери менен шекленеди. Ал нуска бетиниң тегис

емеслиги хакқындағы тийкарғы мағлыұматлар рефлектометриялық иймекликлигиниң  $\theta > (1.5 - 2.0) \theta_{кр}$  мәнислериндеги билинетуғынлығы себепли, турақлы орташа поляризацияланыўы  $\chi_p = \chi_0 v_0$  ( $v_0$  – пленканың салыстырмалы тығызлығы) болған хәм пленка бетиниң хәм пленка-астар шегарасының гедир-будырлылықлары  $\sigma_1$  хәм  $\sigma_2$  болған пленка модельери теоретикалық есаплаўларда қаралмады. Эксперименталлық нәтийжелерди анализлеўде пленка тығызлығының тереңлик бойынша турақлы болыўы мүмкин болған модельери қарап өтилди. Бул жағдайларды есапка алыўшы еки модель қаралды.

Биринши, градиентлик, модельде бир неше өтиў қатламларынан турыўшы, қатламлар аралық шегараларында гедир-будырлылықтың хәм қатлам тығызлықларының өзгериўин сүўретлеў ушын  $\rho(z) = \rho_{max} / (1 + \exp(-z / l))$  түриндеги тығызлық функциясы алынды, ал орташа поляризацияланыўы ушын градиентли түрде қатламлар аралық шегараларда өзгериўи төмендеги формада алынды:

$$\chi(z) = \chi_0 \left[ \frac{v_0}{\left(1 + \exp\left(-1.67 \frac{z}{l_1}\right)\right)} + \frac{1 - v_0}{\left(1 + \exp\left(-1.67 \frac{z - d}{l_2}\right)\right)} \right].$$

Бул жерде  $\chi_0$  – астардың поляризацияланыўы,  $v_0 = (1-p)$ ,  $p (0 \leq p \leq 1)$  – көзгенеклик,  $d$  – пленканың қалыңлығы,  $l_1$  хәм  $l_2$  – жоқарғы хәм төменги өтиў қатламларының қалыңлықлары.

Екинши, ғәрезсиз, модельде пленка N-қатламнан турыўшы деп есаплап, пленка поляризацияланыўының хәр бир n-шы бир текли қатламында басқаларынан ғәрезсиз екенлиги қарап өтилди. Қатламлар аралық шегаралары бирден өтиўши деп қаралып, n-шы қатламының поляризацияланыўы  $\chi(z) = \chi_n$  функциясы түринде, қатлам ортасындағы мәнисине тең деп алынды.

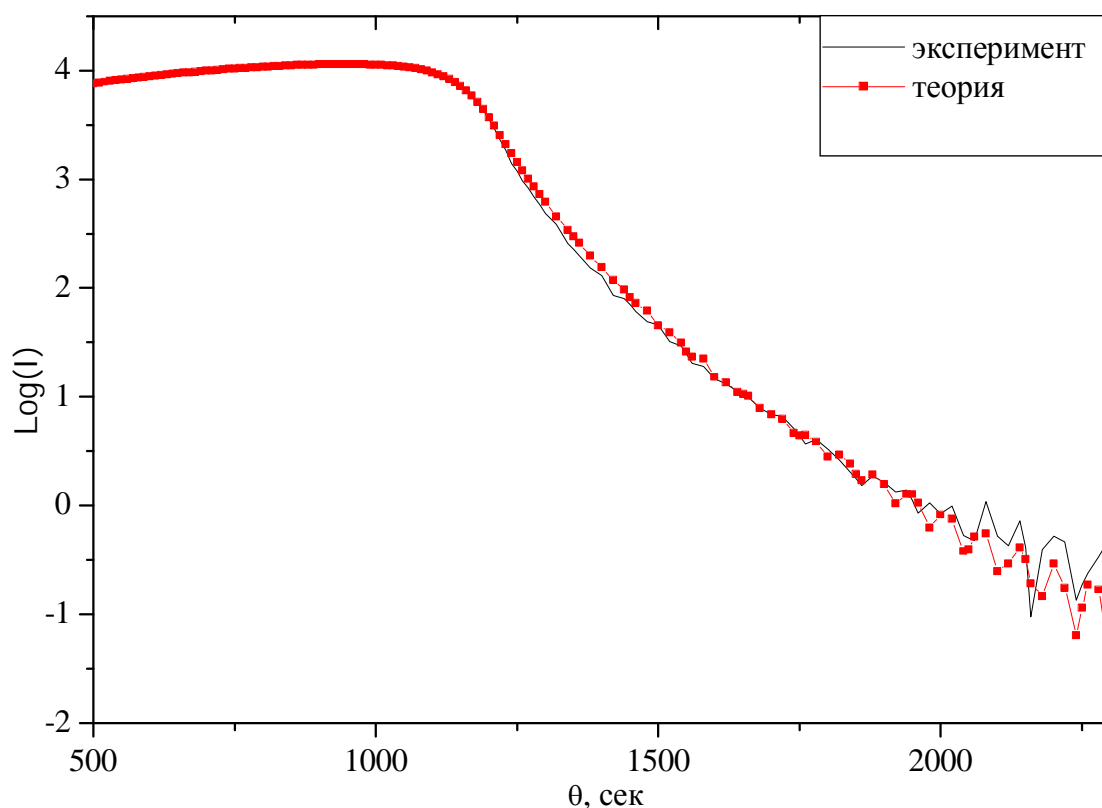
Паррат қатнастары  $\theta$  мүйеш интервалларының барлық мәнислеринде дурыс болатуғынлығы ушын, есапланған иймеклик анықлығы  $\chi(z)$  текше

түрлі функциясының аппроксимациялануы дәрежесі менен шекленеді хәм  $N$  – қатламлар санының өсіуі менен жоқарылайды. Бірақта, бул модельдің шекленуі қатлам аралықтары хәм шегара бетлерінің бір теклі емеслігінен нурлануының шашыратылуын есапқа алмайды.

Нурлануының шағылысуы иймеклерінің градиентлік (модель 1) хәм ғәрезсіз (модель 2) модельлерді қоллануы менен есаплап салыстыруы нәтижелері 8-сүүретте көрсетілген. Сүүретте қоринип турғанындай, бул еки модельде экспериментал нәтижелерді сапалылық жағынан жақсы сүүретлейді. Бірақта, киши мүйешлер этирапында олардың екеуінде экспериментал точкаларына жақсы жақынлағаны менен,  $\theta_{кр}$  мәнісінен алыслаган жағдайларында бир-биринен көзге түсерліктей ажыралып турады. Қатламлардың ғәрезсіз модели экспериментал иймеклігін интенсивлигінің кемеюін де, осцилляция максимумларының формаларын да жақынырақ сүүретлейді.

$\text{CeO}_2$  пленкасының басқа параметрлері: орташа тығызлығы  $\rho = 0.94$   $\rho_{теор}$ , қалыңлығы  $d = 20.7$  нм, жоқарғы шегара бетінің қалыңлығы  $l_1 = 2.5$  нм хәм төменгі астар-пленка шегарасының қалыңлығы  $l_2 = 0.7$  нм, еки модель бойынша да сәйкес келеді.

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  пленкалары  $\text{NdGaO}_3$  астарларында өсирилип, олардың ишіндегі қалыңлығы  $\approx 200$  нм болған пленкалары рентгенрефлектометриялық усылы жәрдемінде изертленді. 9-сүүретте усы пленка үшін экспериментал хәм теориялық есаплаулар менен алынған рефлектометриялық иймекліктер көрсетілген. Бул еки иймеклікті салыстырулар теориялық есаплау жолы менен алынған иймекліктің эксперимент нәтижесін киши мүйешлерден баслап жақсы сүүретлейтуғынлығын көриуимізге болады. Бірақта теориялық есаплаулардың нәтижесінде рефлектометриялық иймеклікте үлкен мүйешлерде пленка қалыңлығы менен байланыссы болған осцилляциялардың орын алуы, ал экспериментал иймеклікте олардың анық емес екенлігі көринип тұрыпты. Экспериментал иймеклікте



9-сүүрет.  $\text{NdGaO}_3$  астарында өсирилген 200нм қалыңлықтағы  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  пленкаларының экспериментал хәм теоретикалық рентгенрефлектометриялық иймекликлери.

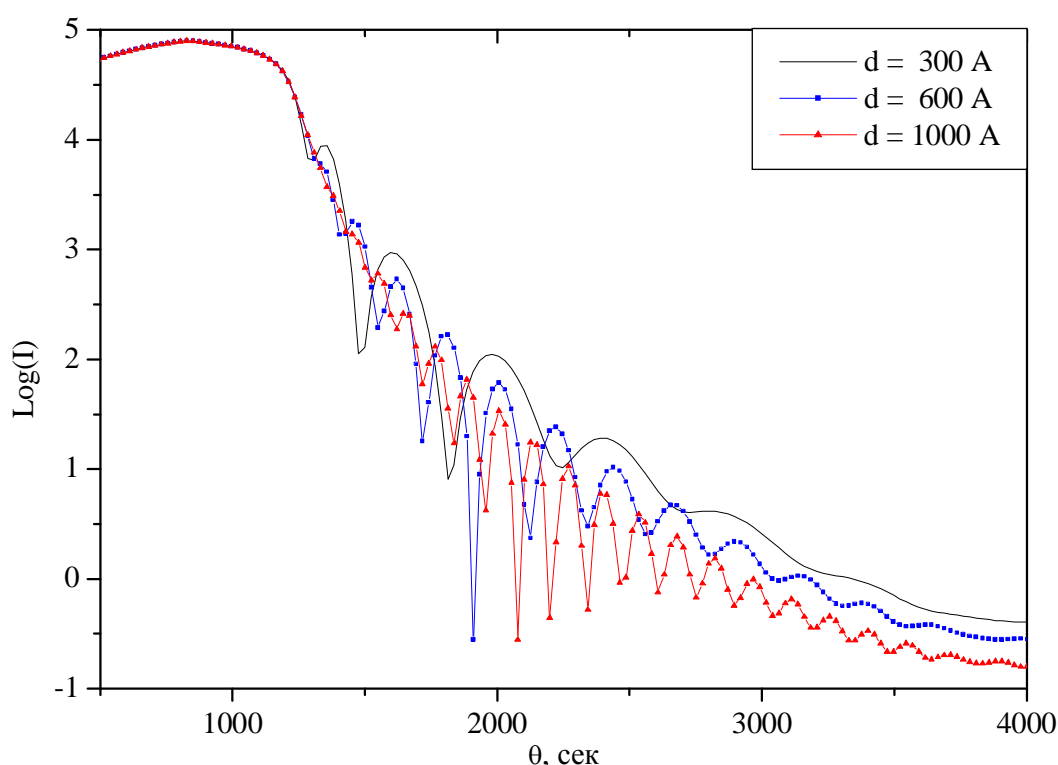
осцилляциялардың көринбеуи қалыңлығы бойынша пленканың бир текли болмауы, пленкада нурланыудың күшли жутылыуы хәмде пленка бетиниң гедир-будырлығының бир қанша жоқары болуы менен байланыслы болуы мүмкин. Сонлықтан, экспериментал натийжелерди териялық жақтан сүүретлеу ушын бул жерде градиентлик модель қолланылды. Өзгериуши параметрлер ретинде өтиу қатламларының қалыңлықлары  $l_1$  хәм  $l_2$ , пленка поляризацияланыуы  $\chi$  қаралып, пленканың қалыңлығы 200 нм ге тең деп алынды.

Сүүретте көринип турғанындай, теоретикалық иймеклик экспериментал иймекликти қанаатландырарлық дәрежеде сүүретлейди.

Моделлестіріу нәтижесінде есапланылып алынған пленка поляризациялануының мәнісі теоретикалық мәнісі менен жақсы сәйкес келеді, пленка тығызлығы хәм де көлеми бойынша бир текли екенлигин көрсетеди. Пленка бетіндеги өтиуши қатлам қалыңлығы  $l_1 = 3.5 - 4.2$  нм, ал астар-пленка шегарасындағы өтиуши қатлам ушын  $l_2 = 0.7$  нм болып табылды.

Соның менен қатар  $\text{NdGaO}_3$  астарында қалыңлықтары 30, 60 хәм 100 нм лерге тең болған  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  пленкалары ушын теоретикалық рентгенрефлектометриялық иймекликлери есапланылып, олар салыстырмалы түрде 10-сүүретте келтирилген.

Бул жерде пленка қалыңлығына байланысly пайда болыушы осцилляциялардың хәм олардың қалыңлыққа байланысly өзгеріулерин анық бақлауға болады.



10-сүүрет.  $\text{NdGaO}_3$  астарында қалыңлықтары 30, 60 хәм 100 нм лерге тең болған  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  пленкалары ушын теоретикалық рентгенрефлектометриялық иймекликлери.

## 2. La-Sr-Cu-O бирикпелеринің жуқа пленкаларын изертлеу.

Аса өткізгіш халының ең сезгір параметрлеринің бири ретінде критикалық температура  $T_c$  ның басымға байланыслылығы болып есапланады. Жоқары температуралы аса өткізгішлерге басымның тәсір етіуі бойынша изертлеулер кеңнен өткерилип, көпшилик жоқары температуралы аса өткізгіш бирикпелерінде  $\partial T_c / \partial p_a > 0$ ,  $\partial T_c / \partial p_c < 0$  болыуы нәтижелери анықланды. Бул жерде  $p_a$  хәм  $p_c$  кристаллографиялық  $a$ -көшери ( $\text{CuO}_2$  тегислигине параллель болған) хәм  $c$ -көшери ( $\text{CuO}_2$  тегислигине перпендикуляр) бойлап тәсір етіуіши басымларды билдиреди. Гидростатикалық басым критикалық температура  $T_c$  ға айтарлықтай тәсірін билдирмейди, ал эпитаксиал кернеудің тәсіри бир қанша жоқары болып табылады. Қысыушы кернеу нәтижесінде тегисликтеги  $a$  параметри қысылып, Пуассон эффектине байланыслы кристалл решеткасының  $c$  параметринің узайыуына алып келеди. Бул жағдайда  $T_c$  критикалық температурасының жоқарылауы күтиледи. Керисинше, тегислик бойлап созыушы кернеу тәсірінде  $T_c$  ның төменлеуі күтиледи. Көбинесе жоқары температуралы аса өткізгіш бирикпелеринің жуқа пленкаларын өсириуде астар ретінде  $\text{SrTiO}_3$  (STO) хәм  $\text{LaSrAlO}_4$  (LSAO) монокристаллары қолланылады. Бул астарлардың кристалл параметрлери менен аса өткізгіш пленкаларының кристалл решетка параметрлери арасындағы айырмашылықлар эпитаксиал кернеулердің пайда болыуына алып келип, пленкалардың аса өткізгішлик халына өтиу температураларына тәсір етіуін бақлауға болады.

STO монокристалл астарын жоқары температуралы аса өткізгіш  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  (LSCO) бирикпесинің жуқа пленкаларын өсириуде қолланғанымызда, астар кристалының решетка параметри  $a = 3.905$  А болып, ал LSCO кристалының  $a = 3.777$  А параметринен 3 % ке үлкен екенлигин көрсетеди. Бул жағдайда астар кристалының пленкаға созыушы кернеу менен тәсір етіуі хәмде соның нәтижесінде критикалық өтиу температурасы  $T_c$

ның төменлеуі күтіледі. Ал LSAO монокристалының решетка параметри  $a = 3.755$  Å болып, ол LSCO кристалл параметринен 0.5 % ке киши болуы себепли, LSAO астарына LSCO пленкаларын өсіргенимізде қысыушы кернеу тәсири астында  $T_c$  ның өсиуін күтеміз.

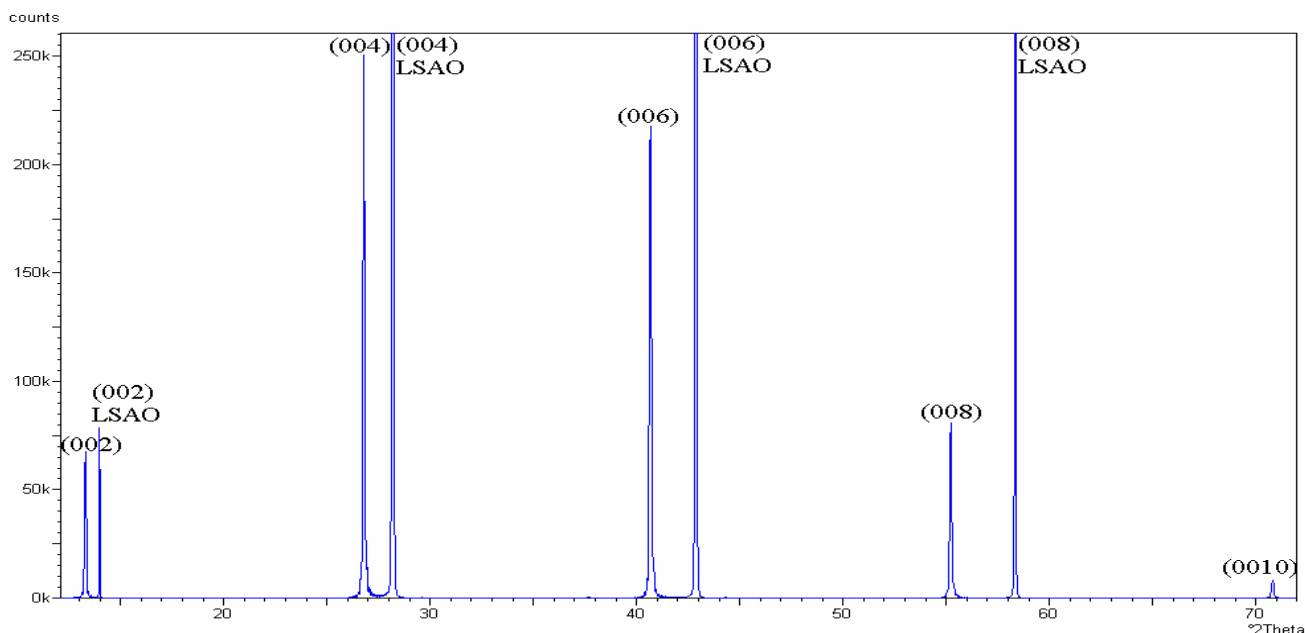
Хақыйқатында да,  $La_{1.9}Sr_{0.1}CuO_4$  монокристалларының аса өткізгіш халына өтиу температурасы  $T_c=25$  К болса, усы составтағы жуқа пленканы LSAO астарында өсириу нәтийжесинде критикалық температурасының 49.1 К ге шекем көтерілиуі экспериментал түрде анықланды [17]. Буннан кейин, Чен хәм т.б. [18] теориялық жақтан LSCO монокристалларының решетка параметри  $a$  ның мәниси 0.5% ке қысылуы нәтийжесинде  $T_c = 49$  К ге шекем жоқарылауы мүмкин екенлигин көрсетти. Бул көз қарасты басқада, жоқары температуралы аса өткізгіш бирикпелерине қолланыу тийкарында хана температурасына жақын болған  $T_c$  мәнислерине жетилисиу мүмкин екенликлери айтылып өтилди. Мысалы,  $Hg_2Ba_2Ca_2Cu_3O_8$  бирикпеси кристалларында  $p = 1$  бар басымда  $T_c = 134$  К ге тең болған болса, басым 310 кбар болған уақытлары  $T_c > 160$  К мәнислерине шекем жетилисиуі мүмкин, тек ғана усындай қысыушы кернеуди пайда етиуши астар монокристалларын табыу керек екенлиги додаланып өтилди [19].

Соның менен бирге, бир қатар илимпазлардың изертлеулері бойынша,  $T_c$  мәнисиниң жоқарылауы кристаллардың  $c$  параметриниң кеңейиуі менен де байланысly деп табылды. Әсиресе буның кристалл структурасына қосымша кислород атомларының сиңирилиуі менен байланысы хаққында хәм де критикалық температураның өсиуінде қосымша кислородтың роли жоқары екенлиги тууралы көплеген изертлеу жұмысларының нәтийжесинде жуумақлар шығарылды [20,21].

Сонлықтан бул жұмыстың барысында, LSCO жуқа пленкаларының сапасын рентгенрефлектометриялық усыллары жәрдемінде изертлеу менен бирге оларда эпитаксиал кернеу хәм қосымша кислород атомларының структуралық параметрлерине хәм физикалық қәсийетлерине тәсирин үйрениуди мақсет етип қойдық. LSCO пленкалары STO хәм LSAO

астарларында,  $x = 0 - 0,35$  аралығындағы составында өсирилип, олардың пленка қалыңлықтары анықланды. Соңынан хәр қыйлы кислород басымы жағдайында пленкалар қыздырылып, олардың структуралық хәм электр өткізгіш қәсийетлери изертленди.

Өсирилген пленкалардың сапасы жүдә жоқары болып, олардың ишинен бир қатары изерлеўлер ушын сайлап алынды. 11-сүүретте 76 нм қалыңлыққа ийе болған LSAO астарында өсирилген пленканың рентгендифрактограммасы келтирилген. Бул жерде пленканың кристаллық сапасының жүдә жоқары екенлигин хәм пленканың бир фазалы екенлигин анық көриўимизге болады.

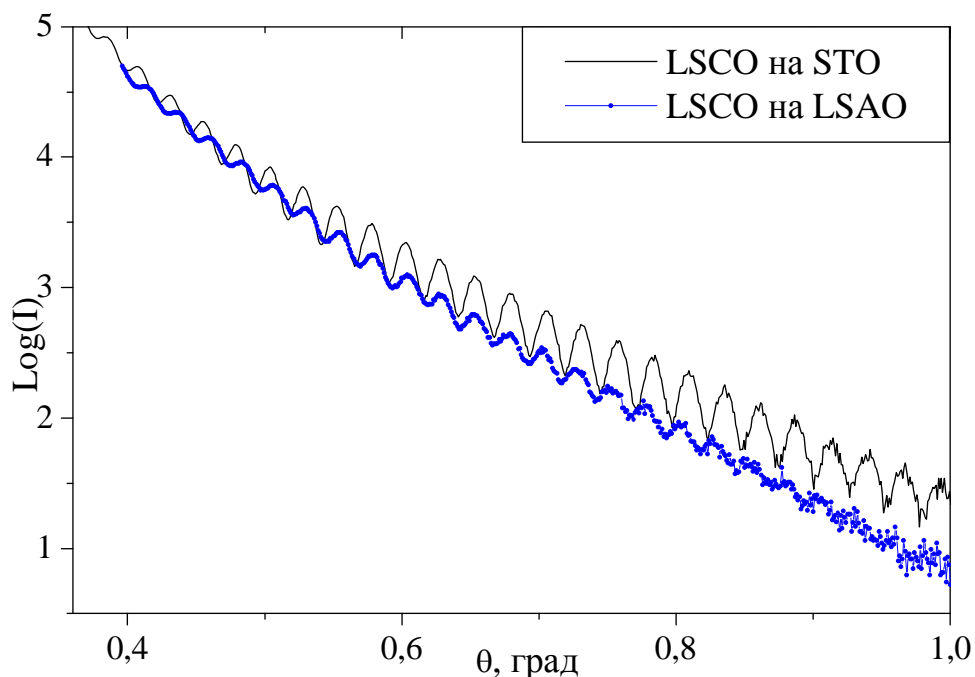


11-сүүрет. 76 нм қалыңлықтағы LSCA астарына өсирилген LSCO пленкасының рентгендифрактограммасы.

Пленканың  $c$  параметри 13.29 Å ге тең болып, (004) рефлекси ушын астардың ярым интенсивлилик шамасындағы ени  $0.01^\circ$ , ал пленка ушын  $0.05^\circ$  ға тең болып табылды. Бул параметрлер пленканың монокристаллық хәм бир текли екенлигиниң көрсеткишлериниң бири болып есапланады. 12-сүүретте усы пленкадан алынған рентгенрефлектометриялық иймеклик келтирилген. Ол жерде интенсивлилик осцилляциясының орын алыўы хәм  $1^\circ$  қа шекемги аралықта бақланыўы пленканың жоқары сапалы екенлигин

билдиреди. Соның менен бирге бул сүүретте STO астарында өсирилген, қалыңлығы 74 нм болған LSCO пленкасының рефлектометриялық иймеклиги де келтирилген.

STO астарында өсирилген пленканың с параметри 13.19 Å болып, бул еки пленканың с параметрлеринің айрықшалығы еки түрлі астардың пленканың структуралық параметрлерине тәсир етиўин сәўлелендиреди. Сүүретте көринип турған киши мүйешлердеги шағылысыў иймегиндеги интенсивлилик осцилляциялары пленканың бетинің тегислигин, пленка структурасының бир теклигин хәм астар менен пленка арасындағы шегараның бир тегис екенлигин көрсетиўши факторлар болып есапланады. STO астарында өсирилген пленкадан алынған рефлектометриялық иймеклигиндеги осцилляция интенсивлигинің бир қанша жоқары болыўы хәм осцилляциялардың үлкен мүйешлерге шекем даўам етиўи, бул



12-сүүрет. 76 нм қалыңлықтағы LSCA астарына хәм 74 нм қалыңлықтағы STO астарында өсирилген LSCO пленкаларының киши мүйешлерде экспериментал рентгенрефлектометриялық иймеклери.

пленканың бетинің, астар-пленка шегарасының бетинің гедир-будырлылығының төмен екенлигинің белгиси болып табылады. Хақыйқатында да, теориялық есаплаўлардың жәрдеминде экспериментал иймекликлерди анализлеўлер LSAO астарында өсирилген пленка ушын қалыңлығы 76 нм, бетинің гедир-будырлылығы 0.5 – 0.7 нм аралығында екенлигин көрсеткен болса, STO астарында өсирилген пленка ушын қалыңлығы 74 нм, ал гедир-будырлылығының мәнислери 0.2 – 0.4 нм аралығында екенлиги анықланды.

Кислород атмосферасында бул еки түрли астарларда өсирилген пленкаларды төмен температураларда, 150-200 °С қыздырып, бул процесслердің пленка қәсийетлерине тәсири көрилип шығылды. Бунда, STO астарында өсирилген пленкалардың критикалық температуралары  $T_c$  4 К нен 40 К ге шекемги аралықта өзгеретуғынлығы анықланды. LSAO астарындағы пленкалар ушын  $T_c$  4 К нен 48 К ге шекем өзгерип, өсирилген пленкалардың астар параметри менен байланысының онша үлкен емес екенлигин көрсетти. Соның менен қатар, бул процесслердің пленканың кристалл решеткасының *c*-параметрине үлкен тәсир жасайтуғынлығы хәм бул тәсирдің пленка қалыңлығына байланыслы екенлиги анықланды. Қалыңлығы 52 нм лик пленкаларда *c*-параметринің қосымша кислород есабынан өзгеріуі 0.04 А шамасында болса, 13 нм лик пленкаларда 0.3 А ге шекем өзгеріулер орын алады. STO астарында өсирилген пленкалардың критикалық температурасының 40 К ге шекем жетиуі, LSCO монокристаллары ушын  $T_c = 25$  К болған жағдайда, хақыйқаттан да  $T_c$  мәнисинің қосымша кислородтың кристалл структурасына кириуі менен байланыслы екенлиги тәрепинің дереги болады. Себеби, STO астарында өсирилген пленкалардың решетка параметрлери астар параметрлери тәсиринде *a*-параметринің өсиуіне, *c*-параметринің киширейиуіне хәм сонлықтан  $T_c$  мәнисинің кемеийиуіне алып келиуі күтилген еди. Ал экспериментал нәтийжелер бойынша *c*-параметринің үлкейиуін хәм  $T_c$  мәнисинің жоқарылауын бақлаймыз.

Солай етип, пленкалардың кристалл параметрлери монокристалл астарлардың тәсири арқасында өзгериуі менен бирге, кислород атмосферасында 150-200 °С этирапында қыздырыу менен де өзгериуі бақланады. Соның менен бирге, қосымша кислород атомларының пленка кристалл структураларына кириуі олардың критикалық температураларының әдеуір жоқарылауына алып келеди. Рентгенрефлектометриялық изертлеу ұсыллары, рентгендифракциялық ұсыллар менен бирликте жуқа пленкаларды изертлеулердің күшли ұсылларын қурайды.

## ЖУЎМАҚЛАЎ

Рентгенрефлектометрия усылы жәрдеминде 200 нм қалыңлығындағы  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  хәм 20 нм қалыңлығындағы  $\text{CeO}_2$  пленкалары, хәмде  $\text{NdGaO}_3$  астарларының бетиниң морфологиясының характеристикалары изертленип шығылды.  $\text{CeO}_2$  пленкаларынан алынған шағылысыў иймеклигинде астар бетинде пленканың бир текли өсиўиниң көрсеткиши болған шағылысыў интенсивлиликлериниң осцилляциялары бақланды. Бул пленкалардың қалыңлықлары, пленка бетиниң хәм астар-пленка шегарасының бир тегис емеслигин характерлеўши коэффицентлер мәнислери, пленкалардың орташа тығызлықлары экспериментал иймекликлерин теоретикалық иймекликлер менен жақынлатыў арқалы анықланды.

$\text{NdGaO}_3$  монокристалл астарларында өсирилген  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  оксидлериниң жуқа пленкаларын изертлеўде экспериментал рентгенрефлектометриялық иймекликлерде интенсивлилик осцилляцияларының бақланбаўы пленканың қалыңлығы бойынша бир текли болмаўын, пленкада нурланыўдың күшли жутылыўын хәмде пленка бетиниң гедир-будырлылығының бир қанша жоқары болыўын көрсетеди. Рентгенрефлектометриялық иймекликлерди моделлестириў арқалы, пленкалардың поляризацияланыўы, тығызлығы, қалыңлығы, пленка бетиниң қалыңлығы хәм астар-пленка шегарасының қалыңлықлары анықланды. Соның менен қатар хәр қыйлы қалыңлықларға ийе болған  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  пленкалары ушын теоретикалық рентгенрефлектометриялық иймекликлери есапланып, олардың сүўретлениўи көрсетилди.

$\text{La-Sr-Cu-O}$  бирикпелериниң хәр қыйлы қалыңлықларға ийе болған пленкалары  $\text{SrTiO}_3$  хәм  $\text{LaSrAlO}_4$  монокристалл астарларында өсирилип, олардың физикалық қәсийетлери, структуралық өзгешеликлери, кислород атмосферасында қыздырыўдың аса өткизгиш ҳалына өтиў температурасының өзгериўине тәсирлери үйренилип шығылып, бул пленкалар рентгендифракциялық хәм рентгенрефлектометриялық усыллар

жәрдеминде характерленди. Олардың кристалл решеткаларының параметрлери, пленка қалыңлықлары, пленка бетиниң характеристикалары анықланды.

## ӘДЕБИЯТЛАР

1. Christensen F.E. // *Revue Phys.Appl.*, 1988, v.23, p.1701.
2. Vendik O. G., Vendik I. B., Kaparkov D. I. // *IEEE Trans. Microwave Theor. Technolol.* 2000, v.46, p.469.
3. Shen Z. // *High-Temperature Superconducting Microwave Circuits*, Boston: Artech House, 1994.
4. Shibata Y., Kaya K., Akashi K. // *Appl. Phys. Lett.* 1992, v.61, p.1000.
5. Parrat L.G. // *Phys.Rev.*, 1954, v.45, p.359.
6. Bednorz J.G., Mueller K. // *Z.Physik*, 1986, v.B64, p.189.
7. Wu M.K., Ashburn J.R., Torng C.J., Hor P.H., Meng R.L., Gao L., Huang Z.J., Wang Y.Q., Chu C.W. // *Phys.Rev.Letter*, 1987, v.58, p.908.
8. Maeda H., Tanaka Y., Fukutumi M., Asano T. // *Japanese J.Appl.Phys.*, 1988, v.27, p.L209.
9. Sheng Z.Z., Hermann A.M. // *Nature*, 1989, v.332, p.55.
10. Putilin S.N., Bryntse I., Antipov E.V. // *Mat.Res.Bull.*, 1991, v.26, p.1299.
11. Putilin S.N., Antipov E.V., Marezio M. // *Physica C.*, 1993, v.212, p.266.
12. Антипов Е.В., Путили́н С.Н. // В сб. «Российская наука», М:Наука, Физматлит, 1997, с.154.
13. Kim D.H., Gray K.E., Kampwirth R.T., Smith J.C., Richeson D.S., Marks T.J., Kang J.H., Talvacchio J., Eddy M. // *Physics C*, 1991, v.177, p.431.
14. Nunez-Regueiro M., Tholence J.L., Antipov E.V., Capponi M. // *Science*, 1993, v.262, p.97.
15. Raveau B., Hervieu M., Pham A.Q., Michel C. // *Physica C*, 1993, v.209, p.153.
16. Miyazaki Y., Yamahe H., Ohnishi N., Kajitani T., Morii Y., Funahashi S., Hirai T. // *Physica C*, 1992, v.198, p.7.
17. Locquet J.-P., Perret J., Fompeyrine J., Machler E. // *Nature*, 1998, v.394, p.453.
18. Chen X.J., Lin H.Q., Gong C.D. // *Phys.Rev.B.*, 2000, v.61, p.9782.

19. Bozovic I. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2001, v.11, p.2686.
20. Sato H., Tsukada A., Naito M., Matsuda A. // *Phys. Rev. B.*, 2000, v.61, p.12447.
21. Mozhaev P.B., Kotelyanskii I. M., Luzanov V.A., Mozhaeva J.E., Donchev T., Mateev E., Nurgaliev T., Bdikin I.K., Narymbetov B. // *Physica C*, 2005, v.419, p. 53.