

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE



Mihails Šorohovs

TIBr KRISTĀLU OPTISKO, ELEKTRISKO UN VIRSMAS ĪPAŠĪBU IZPĒTE; RENTGENA UN GAMMA-STARU DETEKTORU IZSTRĀDE

Promocijas darba kopsavilkums

Doktora zinātniskā grāda iegūšanai fizikā

Apakšnozare: cietvielu fizika

Darba vadītāja *Dr. habil. phys.* Larisa Grigorjeva

Rīga, 2011



LATVIJAS
UNIVERSITĀTE
ANNO 1919

Promocijas darbs izstrādāts no 2004. līdz 2010. gadam Latvijas Universitātes
Cietvielu fizikas institūtā.

Promocijas darba vadītāja: *Dr. habil. phys.* **Larisa Grigorjeva**,
LU Cietvielu fizikas institūta vadošā pētniece.

Recenzenti:

Dr. habil. phys. vad. pētnieks **Jānis Bērziņš**

Dr. habil. phys. prof. **Artūrs Medvids**

Dr. habil. phys. prof. **Māris Knite**

Promocijas darbs tiks aizstāvēts atklātā sesijā LU Fizikas, astronomijas un mehānikas
specializētajā promocijas padomes sēdē, kas notiks 2011. gada 1. martā, plkst.16.00
Cietvielu fizikas institūtā, Ķengaraga ielā 8, konferenču zālē.

Ar darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā, Rīgā,
Kalpaka bulv. 4 un Latvijas Akadēmiskajā bibliotēkā, Rīgā, Rūpniecības ielā 10.

LU Fizikas un astronomijas zinātnes nozares specializētās promocijas padomes
priekšsēdētājs: *Dr. habil. phys.* **Ivars Tāle**

© Latvijas Universitāte, 2011

© Mihails Šorohovs, 2011

ISBN 978-9984-45-305-7

Satura rādītājs

Anotācija	4
1. Ievads	5
1.1 Darba motivācija	5
1.2 Darba mērķi	6
1.3 Autora ieguldījums	7
1.4 Darba zinātniskā novitāte	7
2. Literatūras pārskats	8
2.1 Defekti, elektroniskie ierosinājumi, luminiscences mehānismi un fundamentālas absorbcijas mala tallija halogenīdos	8
2.2 Jonizējoša starojuma pusvadītāju detektora darbības princips	10
3. Pētījumos izmantotās metodikas un paraugi	13
3.1 Optiskā spektroskopija	13
3.1.1 Absorbcijas spektru un absorbcijas kinētiku reģistrācija	13
3.1.2 Luminiscences spektroskopija	14
3.2 Parauga virsmas cietības noteikšanas iekārta	14
3.3 Radiācijas detektora spektroskopisko īpašību reģistrācija	15
3.4 Pētījumos izmantotie paraugi	16
3.5 Kristālu audzēšana Vācijā ar kustīgās zonas metodi	17
4. Rezultāti un diskusija	18
4.1 Tallija bromīda optiskās īpašības	18
4.1.1 Elektronu kūļa ierosinātā luminiscence un īsi dzīvojošā absorbcija TlBr kristālos	18
4.1.2 Rentgenstaru ierosinātā luminiscence TlBr	21
4.1.3 Fundamentālās absorbcijas mala istabas temperatūrā	22
4.1.4 Fotoluminiscence šķidra hēlija temperatūrā	23
4.2 TlBr kristāla virsmas īpašības	25
4.3 TlBr kristāla elektriskās īpašības	27
5. Jonizējošā starojuma detektoru izgatavošana	29
5.1 Detektoru izgatavošanas tehnoloģija	29
5.2 Spektrometriskās īpašības gamma staru detektoriem, izgatavotiem no kristāliem, kas audzēti ar Bridžmena-Stokbargera metodi	29
5.3 Spektrometriskās īpašības gamma staru detektoriem, kas izgatavoti no ar izkausētās kustīgās zonas metodi audzēta TlBr kristāla	31
6. Optisko un elektrisko īpašību korelācija ar detektoru raksturīpašībām	33
7. Aizstāvējamās tēzes	34
8. Literatūras saraksts	35
8.1 Autora publicētie darbi par promocijas tēmu	36
8.2 Autoru publicētie darbi par citām tēmām	37
9. Dalība zinātniskās konferencēs	38
Pateicība	39

Anotācija

TlBr kristālus izmanto istabas temperatūrā darbojošos x un γ staru detektoros, kuri šo starojumu reģistrē enerģijas diapazonā no 5 keV līdz pat 1 MeV. Tas dod iespēju lietot šos detektorus kosmosā, medicīnā, kā arī radionuklīdu analīzē. Neskatoties uz sasniegto progresu detektoru izgatavošanā, ir vairākas problēmas, kas neļauj izvērst detektoru sērijuveida ražošanu. Pašlaik vairākas firmas, kuras audzē kristālus, cenšas attīstīt TlBr kristālu audzēšanas tehnoloģijas, lai iegūtu kvalitatīvus kristālus gan izmantošanai optiskos elementus infrasarkanā spektra rajona, gan arī jonizējošā starojuma detektoros. Taču elektroniskie procesi šajos kristālos ir izpētīti nepilnīgi, nav pietiekamas informācijas par elektriskiem ierosinājumiem, defektiem, piemaisījumiem. Šī darba vispārējais mērķis bija iegūt un apkopot informāciju, kas būtu izmantojama kvalitatīvu jonizējošā starojuma detektoru izgatavošanai no TlBr kristāliem. Tādēļ tika veikti TlBr kristālu elektronisko īpašību pētījumi un to rezultātu analīze, salīdzinot tos ar no šiem kristāliem izgatavoto jonizējošā starojuma detektoru parametrus. Darbā izklāstīti eksperimentos iegūtie dati, veikta to interpretācija un analīze. Pētījumu rezultātā ir atrastas korelācijas starp dažām TlBr kristālu optiskajām īpašībām (absorbēcija, luminiscence) un no tiem izgatavoto jonizējošās radiācijas detektoru parametriem; dotas rekomendācijas kristālu audzēšanas uzlabošanai; izstrādāta metodika TlBr kristālu virsmas apstrādei un uzlabota jonizējošā starojuma detektoru izgatavošanas tehnoloģija.

1. Ievads

Rentgenstaru un gamma staru reģistrācijai galvenokārt izmanto divu veidu ierīces: (I) scintilāciju detektorus, kuri jonizējošā starojuma enerģiju vispirms transformē par redzamās gaismas signālu (scintilāciju), kas fotouztvērējā tiek pārvērsta elektriskajā signālā un (II) detektorus, kuri jonizējošā starojuma enerģiju tieši pārvērš elektriskajā signālā. Otra veida detektoriem ir dažas priekšrocības salīdzinājumā ar pirmā veida detektoriem. Pirmā veida detektoru optiskais signāls jāpārvērš elektriskajā, un ierīces ātrdarbību principiāli ierobežo par scintilācijām atbilstīgo luminiscences centru ierosinātā stāvokļa dzīves laiks. Otra veida detektoros uzreiz tiek iegūts elektriskais signāls, iespējama liela ātrdarbība, jo, izmantojot cietvielu kristālus, tajos tiek radīti lādiņnesēji vadāmības un valentajā zonā un šo lādiņnesēju dzīves laiki zonās ir ļoti īsi. Šī iemesla dēļ otra veida detektori ir plaši izplatīti un pašreiz tajos izmantojamie materiāli ir ģermānija, silīcija, vai kadmija-cinka telurīda kristāli. Taču visiem minētajiem materiāliem ir relatīvi mazs aizliegtās zonas platums (0.67 eV Ge, 1.12 eV Si un 2 eV CdZnTe), tāpēc istabas temperatūrā tajos ir salīdzinoši lielas brīvo lādiņnesēju koncentrācijas, kas apgrūtina radiācijas inducēto signālu reģistrāciju. Minētā iemesla dēļ šos detektorus ir jādzesē, bieži pat līdz šķidrā slāpekļa temperatūrai. Tādēļ tiek intensīvi meklēti materiāli, no kuriem varētu izgatavot nedzesējamus detektorus. Tādam materiālam aizliegtās zonas platumam jābūt lielākam par to, kāds ir pašreiz izmantojamiem materiāliem, taču ne pārāk lielam, lai elektronu un caurumu ģenerācija jonizējošā starojuma iespaidā būtu pietiekami efektīva.

Tallija bromīda (TlBr) kristāli labi atbilst minētajām prasībām un ir daudz-sološs materiāls nedzesējamu rentgenstaru un gamma staru detektēšanai. No šiem kristāliem dažos gadījumos ir izdevies izgatavot jonizējošā starojuma detektorus rentgenstaru un gamma staru reģistrācijai diapazonā no 5 keV līdz 1 MeV [1]. Taču detektoru izgatavošana ar labām spektroskopiskām īpašībām (enerģētisko izšķirtspēju) un nemainīgām īpašībām ekspluatācijas laikā joprojām ir problemātiska.

1.1 Darba motivācija

TlBr piemērotību radiācijas detektoru izgatavošanai nosaka tā īpašības – samērā liels blīvums (7.56 g/cm^3) un liela vidējā atommasa (Tl=81, Br=35) [2], kas nodrošina elektromagnētiskā jonizējošā starojuma efektīvu bremsēšanos materiālā un līdz ar to arī efektīvu elektronu un caurumu ģenerāciju. Savukārt istabas temperatūrā termodinamiski līdzsvaroto lādiņnesēju koncentrācijas vadāmības un valentajā zonā ir mazas, jo materiālam ir relatīvi plata aizliegtā

zona. Taču materiāls vēl pilnībā nav apgūts jonizējošā starojuma detektoru izgatavošanai un ir vairākas neatrisinātas problēmas, kuru dēļ nevar attīstīt jonizējošā starojuma detektoru sērijveida izgatavošanu no šī materiāla. Viena no problēmām ir tā, ka dažkārt no TlBr izdodas izgatavot labus radiācijas detektorus, kuriem ir augsta jutība un laba enerģētiskā izšķirtspēja, taču citos gadījumos izgatavotie detektori vispār nav darbspējīgi. Ir aizdomas, ka tas saistīts ar TlBr kristālu kvalitāti – tīrību. Iespējams, arī ar dislokāciju klātbūtni vai monokristāla morfoloģiju – tas var sastāvēt no kristāliskiem blokiem. Sistemātisku pētījumu rezultātus par šo problēmu neizdevās atrast, tādēļ viens no šī pētījuma virzieniem ir saistīts ar minētās problēmas risināšanu. Otra svarīga problēma ir kvalitatīva elektriskā kontakta nodrošināšana ar TlBr virsmu, jo no šī kontakta ir atkarīga detektora darbība. Kristāliskā detektora sagatave pēc tās izgriešanas no liela monokristāla bloka ir nepiemērota metāliska kontakta uzklāšanai. Šīs problēmas risināšanai tika veikti kristāla virsmas apstrādes ietekmes pētījumi. Savukārt lādiņnesēju ģenerāciju un šo lādiņnesēju savākšanas efektivitāti nosaka materiālā notiekošie elektroniskie procesi – lādiņnesēju saķeršana līmeņos aizliegtajā zonā, lādiņnesēju izkliede uz defektiem, lādiņnesēju savstarpējā rekombinācija. Kvalitatīva detektora izveidei ir nepieciešams izziņāt, kā un kādi elektroniskie procesi notiek materiālā, un, ņemot vērā, ka ziņas par šiem procesiem zinātniskajā literatūrā ir diezgan skopas, pievērsāmies arī šīs problēmas izpētei. Minēto triju problēmu risināšana ir ļoti svarīga, lai attīstītu no TlBr izgatavotu kvalitatīvu jonizējošās radiācijas detektoru ražošanu. Noslēgumā jāpiemin, ka kvalitatīvi radiācijas detektori no TlBr ir perspektīvi izmantošanai kosmosā, medicīnā un arī radionuklīdu detektēšanai un analīzei.

1.2 Darba mērķi

Darba vispārējais mērķis ir iegūt un apkopot informāciju, kas būtu izmantojama, veicot kvalitatīvu jonizējošā starojuma detektoru izgatavošanu no TlBr.

Darbam ir trīs specifiskie mērķi:

1. Noskaidrot vismaz dažus kritērijus, kas ļautu novērtēt konkrētā TlBr kristāla piemērotību kvalitatīvu radiācijas detektoru izgatavošanai.
2. Izstrādāt paņēmieni TlBr monokristāla virsmas sagatavošanai, lai varētu nodrošināt kvalitatīva elektriskā kontakta izveidi.
3. Noskaidrot, kādas TlBr kristāla elektroniskās īpašības korelē ar no šī kristāla izgatavota radiācijas detektora spektroskopiskajām īpašībām.

Darba mērķu sasniegšanai tika risināti šādi uzdevumi:

1. TlBr kristālu optisko īpašību izpēte (fundamentālās absorbcijas malas novietojums, luminiscences spektri un kinētikas, inducētā īsi dzīvojošā absorbcija).

2. TlBr kristālu virsmas īpašību izpēte (virsmas kodināšana, mikrocietības noteikšana, optiskā mikroskopija).
3. Elektrisko īpašību izpēte (voltampēru raksturliknes, īpatnējā pretestība).
4. Jonizējošā starojuma detektoru izgatavošana no TlBr un šo detektoru spektroskopisko īpašību noteikšana.

1.3 Autora ieguldījums

Darbā gaitā darba autors kopā ar ražošanas uzņēmuma SIA BSI darbiniekiem piedalījās TlBr kristālu audzēšanas iniciēšanā un organizēšanā kā Maskavas institūtā GIREDMET, tā arī Vācijas *Korth Crystal* uzņēmumā. Tika realizēta atgriezeniskā saite starp kristālu audzēšanas uzņēmumiem un pētniekiem, kas ļāva modificēt kristālu audzēšanu, lai iegūtu kristālus ar prognozējamām optiskajām un spektrometriskajām īpašībām. Darba autors ir veicis paraugu sagatavošanu eksperimentiem (paraugu griešana un virsmas apstrāde), veicis eksperimentus (luminiscences un absorbcijas spektru reģistrācija un rezultātu apstrāde, kristālu virsmas optisko attēlu iegūšana un voltampēru raksturliķņu reģistrācija). Ražošanas uzņēmumā SIA BSI autors izgatavoja un testēja no TlBr kristāliem izgatavotos detektorus. Iegūtie eksperimentālie rezultāti tika apspriesti kopīgi ar kolēģiem CFI Cietvielu radiācijas fizikas laboratorijā, kā arī ar vadošajiem speciālistiem SIA BSI uzņēmumā. Darba rezultāti ir prezentēti vairākās starptautiskās konferencēs, piedaloties tajās kā ar stenda, tā arī ar mutiskiem referātiem. Darba rezultāti ir publicēti 11 zinātniskajos žurnālos, to skaitā 10 starptautiskos žurnālos.

1.4 Darba zinātniskā novitāte

Galvenā zinātniskā novitāte šajā darbā ir tā, ka pirmo reizi tika salīdzināti rezultāti, kuri iegūti TlBr kristālu optisko īpašību pētījumos, ar to radiācijas detektoru īpašībām, kuri izgatavoti no šiem kristāliem. Atrastas korelācijas starp TlBr optiskajām un radiācijas detektoru spektrometriskajām īpašībām.

Darbam ir arī nozīme radiācijas detektoru ražošanas tehnoloģiju uzlabošanā. Detektoru izgatavošanas tehnoloģiskajam ciklam ir ieteikta un tiek lietota jauna virsmas apstrādes tehnoloģija un arī izstrādāta metode šīs apstrādes kvalitātes kontrolei (mikrocietības metode un vizuāla kontrole, izmantojot optisko mikroskopiju). Dotas arī rekomendācijas TlBr kristālu ražotājiem, lai uzlabotu detektoru izgatavošanai paredzēto kristālu kvalitāti.

2. Literatūras pārskats

2.1 Defekti, elektroniskie ierosinājumi, luminiscences mehānismi un fundamentālas absorbcijas mala tallija halogenīdos

Tallija halogenīdu kristālus izmanto infrasarkanajā spektroskopijā – lēcas, logi, optiskās šķiedras gaismas vadi infrasarkanam spektra rajonam [3]. Ir pierādīts [4], ka no tiem var izgatavot detektorus radiācijas reģistrēšanai.

Visos tallija halogenīdu praktiskās lietošanas virzienos ļoti svarīgs ir jautājums par pašvielas struktūras, piemaisījumu un radiācijas inducētiem defektiem, kā arī par dažādas dabas elektroniskiem ierosinājumiem un to mijiedarbību ar minētajiem defektiem. Tas ir saistīts ar optiskās absorbcijas, luminiscences, elektriskās vadāmības un elektronisko ierosinājumu relaksācijas procesu būtiskām izmaiņām defektu klātbūtnē.

Piemaisījumi tallija halogenīdos var aizņemt katjonu vai anjonu mežglus, aizvietojojot tallija vai halogēna jonu. TlBr ir iespējami homoloģisko halogēna jonu Cl^- un I^- piemaisījumi. Tā kā TlCl un TlBr kristāliem ir vienādas kristāliskās struktūras, tad ir iespējama nepārtraukta TlCl-TlBr cieto šķīdumu rinda. Savukārt TlBr un TlI kristāliem ir atšķirīgas kristāliskās struktūras un tādēļ iespējama tikai daļēja Br jonu aizvietošana ar I joniem, pēdējo koncentrācija TlBr kristālos nevar pārsniegt 10%.

Radiācijas defektu un arī kristālā notiekošo procesu izpētei tallija halogenīdos ir veikti eksperimenti un šo eksperimentu rezultātu interpretācijai izmantota analogija ar sudraba halogenīdiem, kuros defektu veidošanās ir plašāk pētīta un par kuriem ir atrodams vairāk datu zinātniskajā literatūrā. Ir zināms, ka punktveida struktūras defekti – vakances un starpmezglu joni – tallija halogenīdos pārsvarā veidojas katjonu apakšrežģī ($\text{Tl}^{++}\text{V}_c^-$ un Tl_i^0) [5]. Radiācijas inducēto primāro defektu (Frenkeļa pāra) modelis un to iespējamais veidošanās mehānisms ir aprakstīti [6], kur parādīts, ka primāro defektu pāri veido starpmezgla tallija atoms (Tl_i) un uz tallija vakancei tuvākā kristāliskā mezglā esoša tallija jona lokalizēts caurums (Tl^{2+}V_c). Izteikta hipotēze, ka minētais defektu pāris varētu veidoties elektroniskā ierosinājuma – eksitona – bezizstarojuma sabrukšanas procesā. Līdzīgi procesi notiek un primārie defekti veidojas sudraba halogenīdos. Galvenais arguments tam, ka defektu pāris veidojas, sabrūkot elektroniskam ierosinājumam, ir eksperimentos novērotā koloidālā sudraba vai tallija veidošanās sudraba un tallija halogenīdos ultravioletās vai pat redzamās gaismas iedarbības rezultātā. Ir zināms, ka koloidālie centri efektīvi veidojas uz sudraba halogenīdu graudu virsmām un to veidošanos veicina speciāli ievadīti piemaisījumi – sensibilizatori [7].

Defektu izpētei izmanto gan luminescento, gan absorbcijas spektroskopiju. Piemēram, sudraba hlorīdā ir plaši pētīta fotoluminescence 2.5–2.6 eV spektrālajā apgabalā [6, 8] un ir parādīts, ka šī luminescence rodas autolokalizēta eksitona radiatīvas sabrukšanas rezultātā. Process ir aprakstāms ar reakciju:



kur Ag^{2+} ir autolokalizēts caurums un $(\text{Ag}^+)^*$ autolokalizēts eksitons. Autolokalizēts caurums AgCl kristālā veido kompleksu $\text{Ag}^{2+}\text{Cl}_6^-$, un šī centra eksistence ir pētīta ar elektronu paramagnētiskās rezonanses (EPR) un optiski detektējamas magnētiskās rezonanses (ODMR) metodēm. Centram atbilstošā absorbcijas josla ir pie 1.2 eV [9]. Tallija halogenīdos EPR signāls Tl^{2+} līdz šim nav novērots, bet īsi dzīvojoša absorbcija tiek novērota spektrālajā apgabalā, kurš ir tuvs 1 eV [5], un ir secināts, ka arī tallija halogenīdos caurums var lokalizēties uz tallija jona.

AgCl kristālā luminescences dzišanas kinētiku skaidro, izmantojot difūzijas kontrolēta rekombinācijas procesa modeli, kurš teorētiski aprakstīts [7]. Saskaņā ar šo aprakstu process ir sekojošs:



Tiek uzskatīts, ka tallija bromīdā primārā defektu pāra veidošanās un eksitona anihilācija notiek līdzīgi aprakstītajai reakcijai (2), tikai sudraba vietā ir tallijs. Difūzijas kontrolētās rekombinācijas modeļa teorētiskais apraksts TlBr kristālam joprojām vēl nav izstrādāts.

Tallija halogenīdu luminescences pētījumiem ir veltīti vairāki darbi [5, 10, 11]. Zemās temperatūrās, kā arī impulsa ierosināšanas brīdī novērota plata luminescences josla 2.2–2.5 eV apgabalā. Joslas maksimums luminescences spektrā nobīdās uz augsto enerģiju pusi cieto šķīdumu rindā $\text{TlI} - \text{TlBr} - \text{TlCl}$. Visiem tallija halogenīdiem luminescences daba ir līdzīga (eksitona anihilācija), un luminescences joslas maksimuma nobīdi izraisa Tl jona apkārtnes maiņa – viena halogēna jonu aizvietošana ar cita halogēna joniem.

Stacionārās luminescences pētījumos TlBr kristālos ir labi novērojama josla pie 1.8 eV, kura saskaņā ar esošajiem uzskatiem ir saistīta ar starpmezgla Tl joniem vai to agregātiem [7]. Līdzīga luminescences josla novērota TlCl kristālā pie 1.9 eV un secināts, ka tā varētu būt saistīta ar nestehiometrisku Tl jonu pārākumu kristālā [12], savukārt [13] secināts, ka šī luminescence rodas elektronu un caurumu rekombinācijā pie centriem, kuru sastāvā ir katjonu vakance. Darbā [14] secināts, ka 1.9 eV josla ir saistīta ar tallija koloidālo daļiņu veidošanu tallija hlorīdā. Pārākuma tallija atomi var tikt jonizēti gaismas absorbcijas rezultātā un, vadāmības zonas elektroniem rekombinējot ar šiem centriem, novērojama luminescence.

Apkopojot iepriekšējo aprakstu, varam secināt, ka luminiscence 1.8–1.9 eV spektrālā rajonā TlBr kristālos, iespējams, ir saistīta ar tallija starpmezgla atomu, vai arī ar šo atomu agregātiem, jo eksperimenti, kas veikti izmantojot ar talliju bagātinātus kristālus, padara mazvarbūtīgu iespēju, ka luminiscences centra sastāvā varētu būt katjona vakance. Iepriekš minētā iespēja, ka tallija atomu agregātā kāds no atomiem tiek jonizēts un tā rekombinācija ar elektronu ir novērotās luminiscences cēlonis, nav vienīgā. Ir otra iespēja: ja kristālā ir tallija koloidi vai mazāka izmēra agregāti, tad ir iespēja, ka kristālā ir arī lielāka atsevišķu, agregātos neesošu tallija starpmezgļu atomu koncentrācija un uz tallija starpmezgla atoma var tikt lokalizēts caurums, kurš, saņērot elektronu, veido savdabīgu starpmezgļos esošu eksitonu $(Tl_i^0)^*$. Šāda eksitona sabrukšana arī var notikt, izstarojot fononu:



Tallija bromīda zonu struktūras pētījumi [15, 16] rāda, ka par fundamentālās absorbcijas malu ir atbildīgas elektronu slīpās parējas (≈ 2.67 eV), kaut gan to apgabals spektrā daļēji pārklājas ar taisno pāreju apgabalu (≈ 3.02 eV). Šī iemesla dēļ fundamentālās absorbcijas malas apgabala spektrā ir novērojams pakāpiens [17]. Absorbcijas malas apgabalā ierosināto luminiscenci nosaka gan netiešo eksitonu veidošanās (≈ 2.67 eV), gan tiešo eksitonu veidošanās (≈ 3.02 eV).

Fundamentālās absorbcijas malas nobīdi apraksta Urbaha likums [18], kurš ir universāls likums dažādām vielām neatkarīgi no saites tipa (jonu, kovalentās) un struktūras sakārtotības (stikls, kristāls). Parasti, paaugstinoties temperatūrai, fundamentālās absorbcijas mala nobīdās uz zemo enerģiju pusi (aizliegtās zonas platums samazinās). Tallija halogenīdiem šis likums nav spēkā. TlBr kristālos, temperatūrai paaugstinoties, eksitonu absorbcijas maksimums nobīdās uz augsto enerģiju pusi. Minētā efekta cēlonis nav skaidrs, taču tas varētu būt eksitonu-fononu īpašas sadarbības procesu dēļ, piemēram, īpaša fononu frekvenču sadalījuma funkcijas atkarība no temperatūras vai arī visai sarežģītu fononu mijiedarbības procesu dēļ (piemēram, optiska zara fononu anharmoniska sadarbība ar fononu stāvokļu kontinuumu). Pašreiz nav eksperimentālu faktu, kas liecinātu par labu kādam no iepriekš minētiem iespējamiem cēloņiem.

2.2 Jonizējoša starojuma pusvadītāju detektora darbības princips

Pusvadītāji stabili ieņem vadošo vietu kodolfizikas aparātu arsenālā un to nozīme elementārdaļiņu (kvantu) fizikā pieaug. Pusvadītāju detektoru principiālās priekšrocības ir sekojošas:

- 1) Enerģija, kas nepieciešama viena elektronu-cauruma pāra veidošanai, ir neliela (silīcijam, ģermānijam ≈ 3 eV, TlBr ≈ 9 eV).
- 2) Jonizējošo starojumu bremsējošās īpašības cietvielu detektoriem ir ievērojami augstākas nekā gāzes pildītos detektoros.
- 3) Pusvadītāju detektoros lādiņnesēju – elektronu un caurumu – kustīgumam jābūt apmēram vienādam, tas nozīmē, ka lādiņu savākšanas laiks uz elektrodiem maz atšķiras un rezultātā nerodas nopietnas grūtības to daļiņu (kvantu) reģistrācijai, kuras detektorā iespiežas dažādos dziļumos.
- 4) Neskatoties uz to, ka pusvadītāju detektoru izšķiršanas spēja atpaliek no magnētiskiem detektoriem, tie ļauj reģistrēt visu spektru vienlaicīgi.

Lai veidotu elektronu-caurumu pāri, ir nepieciešama enerģija (E), kura pārsniedz aizliegtās zonas platumu (E_g). Ja aizliegtās zonas platums ir pietiekami liels, tad neliels elektriskais lauks neizraisa elektriskās strāvas detektorā. Savukārt, ja aizliegtās zonas platums ir mazs, tad daļa no valentās zonas elektroniem siltuma fluktuāciju dēļ var pāriet vadāmības zonā un parādās strāva, kuru sauc par noplūdes strāvu vai arī par tumsas strāvu.

Jonizējošā starojuma iedarbībā pusvadītājā valentās zonas elektronus vai elektronus no enerģētiski dziļākiem stāvokļiem pārceļ vadāmības zonā vai augstākās neaizpildītās zonās. Rezultātā sākumā neaizpildītās zonās parādās elektroni, bet sākumā aizpildītajā valentajā zonā – caurumi. Pēc sekundārām mijiedarbībām un enerģijas disipācijas ar fononu izstarošanu ļoti īsā laikā ($\approx 10^{-12}$ s) visi elektroni relaksē līdz vadāmības zonas apakšai, bet caurumi līdz valentās zonas augšai. Sakarā ar to, ka enerģija daļēji tiek tērēta fononu ierosināšanai, ierosināšanas procesā enerģija, kura nepieciešama elektronu-caurumu pāra veidošanai, pārsniedz aizliegtās zonas platumu ($2-3 E_g$).

Pusvadītāju detektori pēc būtības ir gāzes jonizāciju kameru analogs, kuros darba vide – gāze ir aizvietota ar cietvielas vidi. Kā jebkurā ierīcē, kura balstīta uz jonizācijas principu, informāciju par krītošās daļiņas (kvanta) enerģiju nes elektriskais lādiņš, kurš tiek radīts daļiņas (kvanta) un detektora materiāla sadarbības rezultātā – jo lielāka daļiņas (kvanta) enerģija, jo lielāks lādiņš tiek radīts detektora materiālā. Lai nodrošinātu spektrometriskos režīmus, ir jāpastāv šādiem nosacījumiem:

- 1) krītošā kvanta enerģijai jābūt detektora jutības apgabālā (t.i., stiprā lauka apgabālā);
- 2) lai nodrošinātu elektriskā signālā proporcionalitāti absorbētā kvanta enerģijai, kvanta radītie elektronu-caurumu pāri pilnībā jāsavāc uz elektrodiem;
- 3) izejas signāla trokšņiem jābūt minimāliem, lai nodrošinātu pietiekamu enerģētisko izšķiršanas spēju.

Izskatīsim, kādām īpašībām jāatbilst materiālam, kurš tiek lietots jonizējošā starojuma cietvielu (pusvadītāju) detektora izgatavošanā.

Pirmkārt, ir nepieciešams, lai augstas enerģijas daļiņas vai fotoni mijiedarbojas ar vielu, veidojot daudz elektronu-caurumu pāru. Elektronu-caurumu pāru koncentrācija pusvadītājos ir lineāri saistīta ar kvanta enerģiju, kura tiek absorbēta vielā, tātad, jo elektronu-caurumu pāra veidošanas enerģija ir mazāka, jo vieglāk ir reģistrēt kvantus ar zemu enerģiju.

Otrkārt, lai detektora ārējā ķēdē parādītos strāvas signāls, lādiņnesēju kustīgumam ārējā laukā jābūt pietiekami lielam. Lai izpildītos linearitāte starp absorbētā kvanta enerģiju un strāvas impulsa amplitūdu, lādiņnesējiem nav vēlams tikt saķertiem uz lamatām. Tas nozīmē, ka lādiņnesēju saķeršanas varbūtībai uz lamatām jābūt minimālai, kas iespējams, ja lamatu koncentrācija ir maza un gan elektroniem, gan caurumiem ir liels kustīgums.

Treškārt, lai detektors reģistrētu vājus signālus, ir nepieciešams, lai detektora noplūdes (tumsas) strāva būtu minimāla pie detektoram pielikta liela elektriskā sprieguma, kas nepieciešams detektora darbībai.

Un beidzot, materiālam jābūt tādām, lai samērā neliela izmēra detektorā jonizējošā starojuma daļiņa vai starojuma kvants tiktu pilnīgi absorbēts. Noskrējiena garums savukārt ir atkarīgs no vielas īpašībām: jo viela ir blīvāka un lielāks Z , jo mazāka izmēra detektoru var izmantot [19].

Detektora enerģētiskā izšķirtspēja ir viena no svarīgākām detektora raksturīpašībām. Enerģētisko izšķiršanu vispirms nosaka jonizācijas zudumu statistiskās fluktuācijas. Šīs fluktuācijas ir iemesls tam, ka enerģijas pīķis, kurš atbilst krītošam monoenerģētiskam kūlim, tiek izmērēts. Enerģētisko izšķiršanu nosaka kā vidējo kvadrātisko amplitūdas nobīdi no maksimālās amplitūdas vērtības. Citiem vārdiem, enerģētiskā izšķiršana (ΔE) tiek noteikta kā attiecīgā pīķa (kurš atbilst enerģijai E) platums pie pusaugstuma (FWHM).

3. Pētījumos izmantotās metodikas un paraugi

Veiktajos pētījumos tika izmantotas optiskās spektroskopijas metodes, parauga virsmas ciētības noteikšana, optiskā mikroskopija un radiācijas detektoru enerģētiskās izšķirtspējas noteikšana.

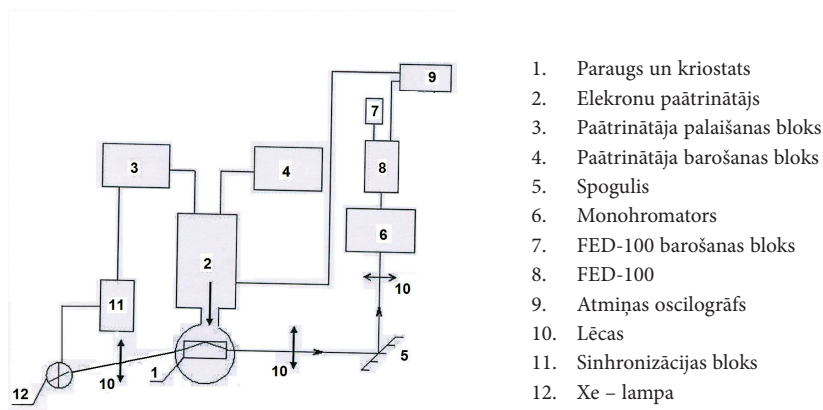
3.1 Optiskā spektroskopija

Pētāmajiem paraugiem tika reģistrēti stacionārie absorbcijas spektri, īsi dzīvojošās inducētās absorbcijas spektri un šīs absorbcijas relaksācijas kinētikas. Tika izmantota arī luminiscentā spektroskopija, gan stacionārā, gan ar laika izšķirtspēju.

3.1.1 Absorbcijas spektru un absorbcijas kinētiku reģistrācija

Stacionārās absorbcijas spektru reģistrācija tika izmantota paraugu fundamentālās absorbcijas malas pētījumos. Spektru reģistrācija veikta ar LABOMED spektrofotometru UVS-2800, kura galvenie raksturojošie parametri ir šādi: darbības spektrālais diapazons no 190 līdz 1100 nm; spektrālā izšķirtspēja 0.5 nm; viļņu garuma atkārtojamība, mērot spektru vairākkārt, ir ne sliktāka par ± 0.2 nm; gaismas caurlaidības mērījumu precizitāte, ko nosaka izkliedētā gaisma, ne sliktāka par 0.3% (pie 220 nm); maksimālais optiskais blīvums, kuru var nomērīt gaismu neizkliedējošam paraugam ir 2.4. Visi stacionārās absorbcijas spektri reģistrēti istabas temperatūrā.

Inducēto īsi dzīvojošās absorbcijas spektru un kinētiku reģistrācija tika veikta, izmantojot iekārtu, kuras funkcionālā shēma parādīta 1. attēlā. Inducētās



1. att. Inducētās īsi dzīvojošās absorbcijas reģistrācijas iekārtas funkcionālā shēma

absorbcijas ierosināšanai izmantots elektronu kūļa impulss ar pusplatumu 10 ns un ierosmes enerģiju 270 keV. Ksenona lampa, kura darbojās impulsa režīmā, tika izmantota par zondējošās gaismas avotu. Parauga temperatūra eksperimentos iespējama no 80 līdz 600 K. Reģistrācijas kanāla laika izšķirtspēju nosaka izmantotais fotoelektronu daudzkārstotājs (FED).

Izmantojot FED-100, laika izšķirtspēja ir 12 ns. FED-100 doto signālu reģistrē TEKTRONIX atmiņas oscilogrāfs TDS-5052B, kura laika izšķirtspēja ir 0.7 ns. Iekārtā izmantots difrakcijas monohromators MDR-2, darbības spektrālais diapazons 200–2500 nm. Iekārtu var izmantot arī ar elektronu kūli ierosinātas luminiscences spektrāli-kinētiskiem pētījumiem. Luminiscences starojums tiek fokusēts uz monohromatora ieejas spraugu, un ksenona lampa netiek izmantota.

3.1.2 Luminiscences spektroskopija

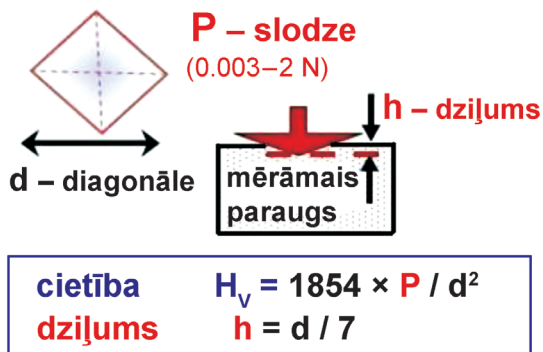
Luminiscences reģistrācijai arī tika izmantotas divas metodes – spektru reģistrācija, izmantojot nepārtrauktas darbības ierosmes avotu (stacionārās luminiscences spektri), un spektru un luminiscences dzišanas kinētiku reģistrāciju, izmantojot impulsvēda ierosmi (luminiscence ar laika izšķiršanu). Stacionārās luminiscences ierosmei tika izmantoti rentgenstari. Luminiscences intensitātes reģistrācija tika veikta fotonu skaitīšanas režīmā.

Parauga temperatūra eksperimentos iespējama no 80 līdz 600 K. Izmantots prizmas monohromators SPM-1. Rentgenstaru lampas anoda spriegums līdz 50 kV, strāva līdz 10 mA. Dzīvsudraba lampa izmantota, lai paraugā radītu koloīdus, paraugu apgaismojot ar nefiltrētu šīs lampas gaismu.

Luminiscenci ar laika izšķiršanu reģistrēja, izmantojot divas iekārtas – jau iepriekš aprakstīto iekārtu, kurā luminiscenci ierosina elektronu kūļa impulsi, un otru iekārtu, kurā luminiscenci ierosina ar YAG:Nd lāzera starojuma ceturtais harmonikas (266 nm, jeb 4.66 eV) impulsiem. Šajā iekārtā atšķirībā neiekārtas, kurā luminiscenci ierosina ar elektronu kūli, parauga temperatūra eksperimentos iespējama no 12 līdz 350 K. Luminiscences intensitātes reģistrācija tiek veikta ar fotonu skaitīšanas metodi, kas kinētiku reģistrācijai nodrošina plašāku dinamisko diapazonu nekā oscilogrāfiskā metode. Ierosmes impulsa garums pusaugstumā ir 2 ns, reģistrējošā kanāla izšķirtspēja laikā ir 0.25 ns.

3.2 Parauga virsmas cietības noteikšanas iekārta

Virsmas kvalitātes kontrolei izvēlējamies mikrocietības mērījumus (pēc Vikersa) un optiskās mikroskopijas metodes. Eksperimenta metodika ir attēlota 2. attēlā.

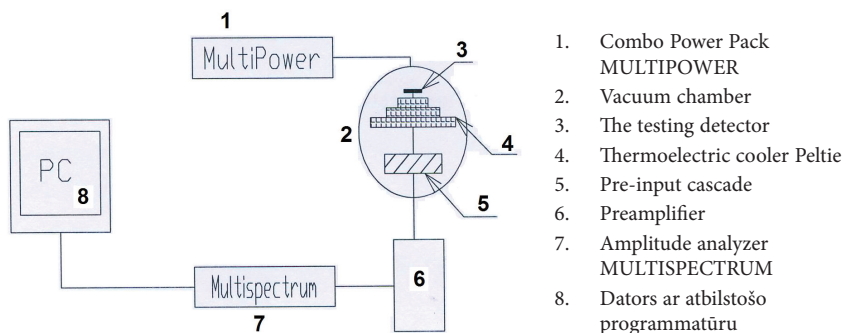


2. att. Mikrociētības (H_v) mērišanas iekārtas darbības princips un mikrociētības parametru noteikšana

Eksperimentos tika izmantoti ar Bridžmena-Stokbargera metodi audzēti TlBr monokristāli. Analizēti dažādu sēriju paraugi (A, L un S), ar biezumu 2 mm un laukumu $5 \times 5 \text{ mm}^2$. Mikrociētības mērijumiem tika izmantots mikrociētības mēritājs PMT-3 (LOMO, Krievija) ar uzlabotu sloģošanas mezglu, indentors – Vikersa piramīda. Mikrociētība H_v tika aprēķināta kā $1.854 P/d^2$, kur P ir slodze un d ir piramīdas atstātā iespaiduma diagonāles garums, kas izmērāms optiskajā mikroskopā.

3.3 Radiācijas detektora spektroskopisko īpašību reģistrācija

No TlBr kristāliem izgatavoto radiācijas detektoru spektroskopiskos parametrus noteica un detektora darba spējas pārbaudīja, izmantojot iekārtu, kuras funkcionālā shēma apskatāma 3. attēlā.



3. att. Radiācijas detektoru parametru testēšanas iekārtas funkcionālā shēma

Iekārtā detektori tika pārbaudīti dažādas enerģijas gamma staru detektēšanai. Gamma staru ievadišanai vakuumkamerā ir Be logs, kurš attēlā 3. nav parādīts. Par gamma staru avotiem tika izmantoti radioizotopi, kas dod monohromatisku gamma starojumu, proti, Fe-55, Am-241, Co-57 un Cs-137. Šo izotopu emitētā gamma starojuma enerģijas ir atbilstoši 5.9 keV, 59.6 keV, 122 keV un 662 keV. Izmantojot šos avotus, bija iespējams pārbaudīt detektoru darba spējas plašā gamma staru enerģiju apgabalā.

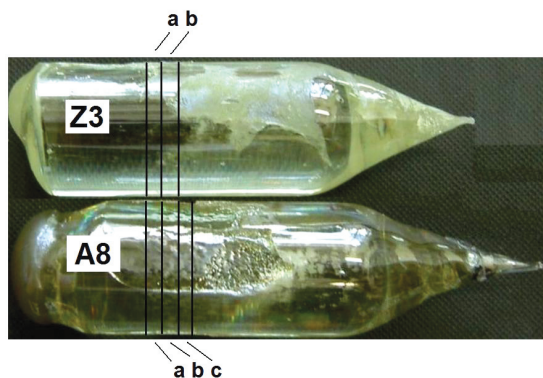
3.4 Pētījumos izmantotie paraugi

Pētījumos izmantojamus paraugus izgriezta plāksnišu veidā no lieliem masīviem monokristāliem, kurus piegādāja divas organizācijas, kas audzē TlBr monokristālus. Viena no organizācijām ir Krievijā, Maskavā (GIREDMET), kurai ir ilggadīga pieredze tallija halogenīdu attīrīšanā no piemaisījumiem un šo monokristālu audzēšanā. Attīrīts TlBr tiek lietots lielu, masīvu monokristālu audzēšanai ar Bridžmena-Stokbargera metodi. Otra organizācija ir Vācijā (uzņēmums *Korth Crystal*), TlBr kristālu audzēšana šajā organizācijā ir uzsākta nesēn, un to realizē ar kustīgas izkausētās zonas metodi, tādējādi vienlaikus TlBr attīrot un iegūstot masīvu monokristālu. Šajā darbā aprakstītajos pētījumos izmantoto paraugu apzīmējumi un izcelsmes avots ir apkopoti zemāk, kaut gan reāli pētīto paraugu skaits bija lielāks.

Pētījumos izmantotie kristāli:

ar Bridžmena-Stokbargera metodi audzēti – M12, M13, M14, A8a, A8b, A8c, Z3a, Z3b, Z4a, Z4b, A1(B1), L, S;

ar izkausētās kustīgās zonas metodi audzēti – 4R, 4RB1



4. att. Ar Bridžmena-Stokbargera metodi izaudzētie TlBr kristāli

Lielākais skaits pētījumos izmantoto kristālu audzēti ar Bridžmena-Stokbargera metodi organizācijā GIREDMET, Maskavā. 4. attēlā ir parādītas TlBr monokristāliskās sagataves, kuras izaudzētas ar šo metodi.

Bridžmena-Stokbargera metode tiek plaši lietota dažādās laboratorijās kristālu audzēšanai [20]. Šī metode ir gandrīz vienīgā, ar kuru audzē tallija halogenīdu kristālus industriālām vajadzībām. Galvenā priekšrocība šai audzēšanas metodei ir tā, ka var izaudzēt liela diametra (≈ 4 cm) tallija halogenīdu kristālus. Ir redzams, ka kristāli ir atšķirīgi pēc vizuālā izskata, un tas liecina, ka ir ļoti grūti iegūt identiskus kristālus [21].

3.5 Kristālu audzēšana Vācijā ar kustīgās zonas metodi

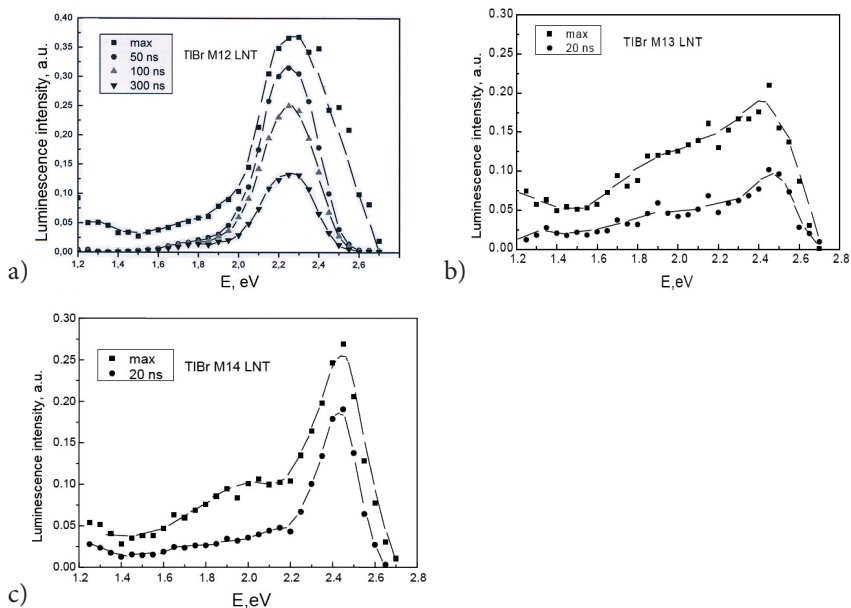
Darbā tika izmantoti arī Vācijas uzņēmumā *Korth Crystal GmbH* ar izkausētās kustīgās zonas metodi izaudzēti TlBr kristāli. Izkausētās kustīgās zonas metodi parasti lieto izejmateriālu attīrīšanai no piejaukumiem, taču metode ir lietojama arī kristālu audzēšanai. Rezultātā materiāla attīrīšana un kristālu audzēšana notiek vienā un tanī pašā ampulā, kas ļauj neievest papildus piemaisījumiem, pārlādējot materiālu no ampulas ampulā kā tas notiek Bridžmena-Stokbargera metodē. Izkausētās kustīgās zonas metodei ir divas nepilnības, proti, (I) nav iespējams audzēt tik liela diametra kristālus kā ar Bridžmena-Stokbargera metodi un (II) izaudzētajam kristālam attīrītā daļa un daļa ar paaugstinātu piemaisījumu saturu nav atdalītas [1, 22].

4. Rezultāti un diskusija

4.1 Tallija bromīda optiskās īpašības

4.1.1 Elektronu kūļa ierosinātā luminiscence un īsi dzīvojošā absorbcija TlBr kristālos

Ar elektronu kūli inducētā absorbcija un luminiscence pētīta trijos TlBr paraugos, (M12, M13 un M14), kuri sagatavoti no lieliem, masīviem monokristāliem, kas audzēti ar Bridžmena-Stokbargera metodi. Rezultāti par šiem eksperimentiem un to analīzi ir publicēti {1}¹. Luminiscences spektri reģistrēti šķidrā slāpekļa temperatūrā (istabas temperatūrā luminiscence ir dzēsta), ierosinot paraugus ar elektronu kūli. Minētie luminiscences spektri redzami 5. attēlā. Analizējot spektrus, varam izdalīt divus luminiscences

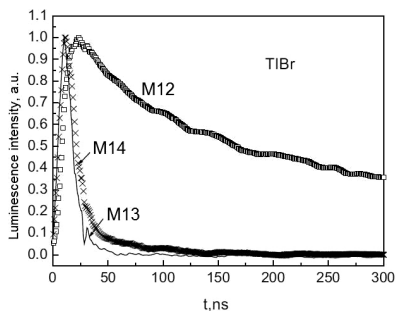


5. att. Ar elektronu kūļa impulsiem ierosinātās luminiscences spektri paraugiem M12, M13 un M14, atbilstoši attēli a, b un c. Apzīmējums „max” atbilst spektram, kas reģistrēts ierosmes impulsa laikā. Pārējie spektri reģistrēti pēc ierosmes impulsa, atbilstošais kavējums norādīts attēlos

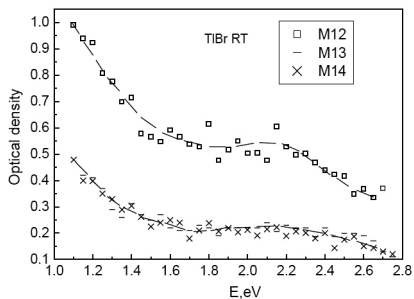
¹ Turpmākā tekstā citējot šī darba autora publikācijas, izmantots apzīmējums { }

spektra apgabals – pie 1.8 eV un 2.2–2.4 eV. Salīdzinot spektrus, ir redzams, ka paraugiem M13 un M14 luminiscences joslas novietojums spektra augsto enerģiju apgabalā ir pie ≈ 2.45 eV un luminiscences joslu forma un novietojums laikā mainās maz. Paraugam M12 luminiscences josla spektra augsto enerģiju apgabalā ir atšķirīga – joslas maksimums ir pie ≈ 2.25 eV un pirmajās 50 ns pēc ierosmes impulsa šīs joslas forma mainās, izzūd daļa no luminiscences joslas augsto enerģiju puses.

Atšķirības luminiscences spektros rāda, ka paraugos ir atšķirīgi luminiscences centri, tātad paraugos ir dažādi gadījuma piemaisījumi vai arī atšķirīgi pašvielas defekti. Pārbaudot paraugu sastāvu (Tab. 1), tika konstatēts, ka paraugs M12 satur paaugstinātu joda koncentrāciju. Var secināt, ka liela joda koncentrācija ir atbildīga par luminiscences joslas nobīdi uz zemo enerģiju pusi paraugam M12. Luminiscences dzišanas kinētikas reģistrētas pie 2.3 eV, paraugiem M13 un M14 tās ir ļoti tuvas, bet paraugam M12 luminiscences dzišanas kinētika ir stipri atšķirīga, kā tas redzams 6. attēlā.



6. att. Paraugu M12, M13 un M14 2.3 eV luminiscences dzišanas kinētikas



7. att. Inducētas absorbcijas spektri istabas temperatūrā

Paraugiem M13 un M14 luminiscences intensitāte pirmajās 50 ns samazinās ≈ 10 reizes. Paraugā M12 luminiscences dzišanas kinētika ir garāka, bet spektra izmaiņas pirmajās 50 ns (sk. 5. att. a) rāda, ka arī parauga M12 luminiscenē ir 2.45 eV joslas ieguldījums un novērotās spektra izmaiņas ir sekas luminiscences joslas pie 2.45 eV izzušanai pirmajās 50 ns. Tātad paraugā M12 ir papildus luminiscences josla pie 2.2 eV un līdz ar to papildus iespēja lādiņnesēju saķeršanai. Lādiņnesēju saķeršana var notikt ne tikai luminiscences centros, bet arī uz defektiem, kuri luminiscenē nepiedalās. Šī iemesla dēļ tika veikta inducētās īsi dzīvojošās absorbcijas reģistrācija, šīs absorbcijas spektri redzami 7. attēlā.

Inducētās īsi dzīvojošās absorbcijas reģistrācija veikta tā, lai zondējošās gaismas optiskais ceļš paraugos būtu vienāds. Tādēļ inducētā optiskā blīvuma vērtības paraugos var savstarpēji salīdzināt.

Novērotas absorbcijas joslas divos spektrālajos apgabalos (<1.1 eV un pie 2.2 eV). Paraugiem M13 un M14 īsi dzīvojošās absorbcijas spektri sakrīt, taču paraugam M12 īsi dzīvojošās absorbcijas izsauktais optiskais blīvums ir vismaz divas reizes lielāks visā spektrā. Varam secināt, ka īsi dzīvojošie radiācijas defekti efektīvāk veidojas paraugā M12. Iespējamais iemesls ir īsi dzīvojošo defektu stabilizācija pie kristālā esošiem piemaisījumiem. Ņemot vērā, ka paraugā M12 ir liela joda koncentrācija (sk. tabulu 1), nav izslēgts, ka arī citu defektu koncentrācija šajā paraugā ir paaugstināta. Konkrēto defektu veidu, kuri ir atbildīgi ar īsi dzīvojošās absorbcijas palielināto līmeni paraugā M12, neizdevās noskaidrot.

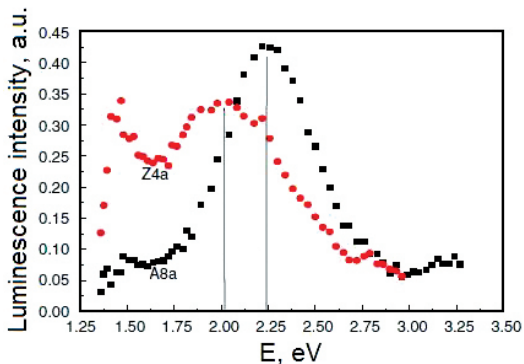
Tabula 1. Paraugu M12, M13 un M14 dažu raksturīpašību salīdzinājums

	M12	M13	M14
$R (\Omega \cdot \text{cm})$	1.2×10^{10}	1.3×10^{10}	1.6×10^{10}
$\mu\tau_e (\text{cm}^{-1})$	---	5×10^{-5}	3×10^{-5}
$\mu\tau_h (\text{cm}^{-1})$	---	Initially $\approx \mu\tau_e$, followed by degradation	Initially $\approx \mu\tau_e$, followed by degradation
$Cl (\text{ppm})$	300	100	---
$I (\text{ppm})$	6000	40	---
Δt	300 ns+ slow μs component	22 ns	28 ns+ slow μs component

Tabulā 1 ir apkopota informācija par paraugu M12, M13 un M14 dažām īpašībām, proti, īpatnējo pretestību R , lādiņnesēju kustīgums-dzīveslaiks elektroniem un caurumiem $\mu\tau_e$ un $\mu\tau_h$, homologo anjonu Cl^- un I^- koncentrāciju un lādiņnesēju savākšanas laiku Δt . No šīs tabulas ir redzams, ka paraugam M12 lādiņnesēju savākšanas laiks ir daudz garāks nekā pārējiem paraugiem. Izgatavojot un testējot radiācijas detektorus no paraugiem M12, M13 un M14, tika atrasta korelācija starp optisko īpašību pētījumu rezultātiem un detektoru spektrometriskajām īpašībām. Detektors, kas izgatavots no parauga M12, vispār nedarbojās – nebija iespējams lādiņnesējus savākt uz elektrodiem. Acīmredzot homologā anjona joda piejaukums, kas ir vislielākajā koncentrācijā M12 paraugā, rada labvēlīgus apstākļus lādiņnesēju saķersšanai un tādējādi detektorā tiek traucēta lādiņnesēju savākšana uz elektrodiem. Šī iemesla dēļ nebija iespējams noteikt $\mu\tau$ šim paraugam.

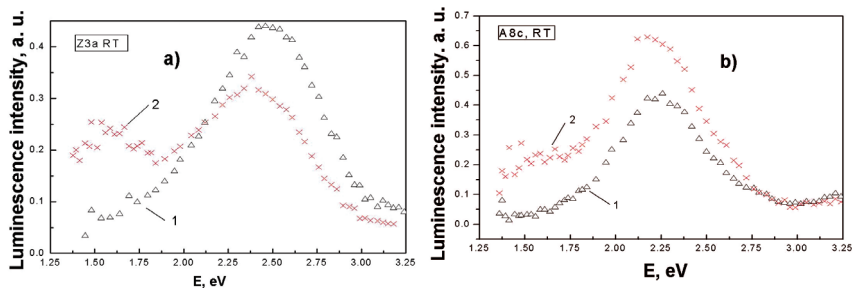
4.1.2 Rentgenstaru ierosinātā luminiscence TlBr

Gaismas iedarbībā tallija halogenīdos var veidoties koloīdi [7], kuru klātbūtne kristālā var atstāt iespaidu uz lādiņnesēju savākšanas efektivitāti no kristāla izgatavotajā radiācijas detektorā. Šī iemesla dēļ virknei ar Bridžmena-Stokbargera metodi audzētiem paraugiem pārbaudījām, vai ar luminiscento metodi var konstatēt paaugstinātu koloīdu koncentrāciju TlBr kristālos. Šo pētījumu rezultāti ir publicēti [2]. Koloīdu radišanai TlBr kristālus apstaroja ar dzīvsudraba lampas nefiltrētu gaismu. Daļai paraugu vēl pirms apstarošanas ar gaismu no dzīvsudraba lampas ir atšķirīgi luminiscences spektri, kas norāda uz atšķirīgu defektu saturu kristālos. Lielākās atšķirības novērojām paraugiem A8a un Z4a. Sākotnējie luminiscences spektri šiem paraugiem parādīti 8. attēlā, un tie ir atšķirīgi, parauga A8a galvenā luminiscences josla ir pie 2.25 eV un mazas intensitātes josla pie ≈ 1.5 eV, savukārt paraugā Z4a ir divas apmēram vienādas intensitātes luminiscences joslas, kuru maksimumi ir pie ≈ 2.0 eV un 1.5 eV. Abos paraugos novērotā luminiscence ir saistīta ar defektiem. Eksperimentu apstākļu novērtējums un iegūto rezultātu analīze rāda, ka paraugā A8a ir mazāks struktūras defektu saturs nekā paraugā Z4a, tāpēc ir iespējams, ka defektu veidi abos paraugos ir līdzīgi vai pat vienādi un atšķirības spektros saistītas ar atšķirīgu dažādu defektu koncentrāciju šajos paraugos.



8. att. Stacionārās luminiscences spektri paraugiem A8a un Z4a, ierosinot tos ar rentgenstariem istabas temperatūrā

Lai pārbaudītu iespējamo koloīdu ietekmi uz paraugu luminiscenci, tika izvēlēti divi dažādi paraugi Z3a un A8c. Pēc sākotnējā rentgenluminiscences spektra reģistrācijas paraugus, neizņemot tos no iekārtas, apgaismoja četras stundas ar nefiltrētu gaismu no dzīvsudraba lampas un atkārtoti reģistrēja luminiscences spektrus (9. att.).



9. att. **Luminiscences spektri TlBr kristāliem, ierosinot tos ar rentgenstariem līdz(1) un pēc (2) apstarošanas ar gaismu no dzīvsudraba lampas; a) Z3a un b) A8c paraugam**

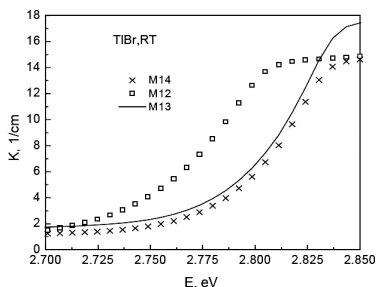
Paraugā Z3a gaismas radītie defekti veidojas efektīvāk nekā paraugā A8c. Paraugā Z3a neliela luminiscences josla pie $\approx 1,5$ eV ir jau pirms tā apstarošanas ar dzīvsudraba lampas gaismu. Šī josla ir saistīta ar koloīdu klātbūtni kristālā, un joslas intensitātes ievērojams pieaugums, paraugu apstarojot ar gaismu no dzīvsudraba lampas, liek secināt, ka šajā paraugā ir labvēlīgi koloīdu veidošanās apstākļi.

4.1.3 Fundamentālās absorbcijas mala istabas temperatūrā

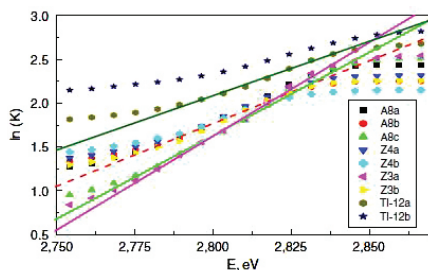
Fundamentālās absorbcijas mala ir ļoti jutīga pret kristāla sastāvu un homologiskiem piemaisījumiem. Piemēram, TlBr-I gadījumā, mala nobīdās uz zemo enerģiju pusi, bet TlBr-Cl gadījumā – uz augsto enerģiju pusi. Tāpēc fundamentālās absorbcijas malas novietojums un forma var sniegt informāciju par piemaisījumu un citu struktūras defektu saturu kristālā. Mūsu veikto pētījumu rezultāti par fundamentālās absorbcijas malu TlBr kristālos ir publikācijās {1,2}, kurās ir parādīta arī saite starp fundamentālās absorbcijas malas novietojumu (arī formu) un no šiem kristāliem izgatavoto radiācijas detektoru īpašībām. Absorbcijas reģistrācija fundamentālās absorbcijas malas apgabalā pētītajiem paraugiem tika veikta istabas temperatūrā. 10. attēlā ir parādīti TlBr paraugu M12, M13 un M14 absorbcijas malas spektri.

Kā redzams 10. attēlā, parauga M12 fundamentālās absorbcijas mala ir nobīdīta uz zemo enerģiju pusi salīdzinājumā ar paraugiem M13 un M14. Kā jau tika parādīts iepriekš, paraugam M12 ir palielināta joda koncentrācija, kas ir iemesls fundamentālās absorbcijas malas nobīdei. Fundamentālās absorbcijas malas novietojums tika analizēts, reģistrējot virkni TlBr paraugu, un iegūtie rezultāti tika attēloti puslogaritmiskajās koordinātēs, jo tajās ir iespējams samērā plašs apgabals, kurā fundamentālās absorbcijas mala ir aproksimējama ar taisni puslogaritmiskajā mērogā. Šis taisnes novietojums un slīpums ļauj vieglāk

salīdzināt rezultātus, kas iegūti dažādiem paraugiem. 11. attēlā ir parādīti rezultāti par 9 paraugu fundamentālās absorbcijas malu.



10. att. **Fundamentālās absorbcijas mala trim dažādiem TlBr kristāliem**



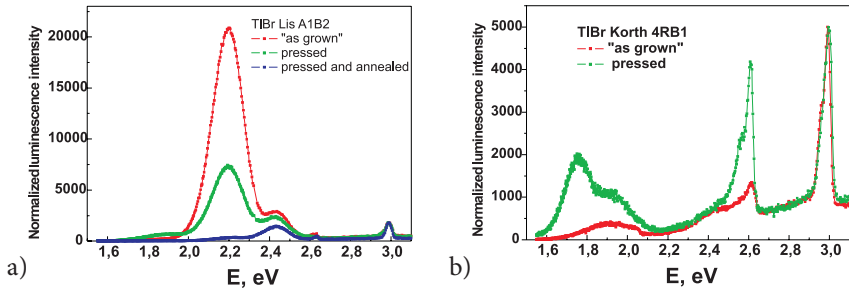
11. att. **Fundamentālā absorbcijas mala vairākiem TlBr kristāliem**

Pamatojoties uz eksperimentāliem rezultātiem, varam secināt, ka pieciem paraugiem, kuriem fundamentālās absorbcijas malas novietojums sakrīt ar pārtraukto sarkano līniju, sastāvs un struktūras defekti ir apmēram vienādi un varam pieņemt, ka tas ir TlBr sastāvam atbilstošs. Paraugiem A8c un Z3a slīpumi nesakrīt ar sarkano līniju un tas nozīmē, ka šo paraugu sastāvs atšķiras no TlBr sastāva. Paraugi A8c un Z3a ir izgriezti no tām pašām A8 un Z3 monokristāliskām sagatavēm, kurām ir TlBr sastāvs, bet homoloģisko piemaisījumu koncentrācija var mainīties monokristāla sagataves galos. Pieļaujam, ka paraugiem ir neliels homoloģisko jonu, piemēram, hlorīdjonu piemaisījums. Paraugam TL-12a ir apmēram tāds pats fundamentālās absorbcijas malas slīpums, kāds novērots pārējiem TlBr kristāliem, bet ir papildus absorbcija pie enerģijām, kas zemākas par 2.7 eV. Šī absorbcija var būt saistīta 1) ar koloidu centru platu joslu 2) ar struktūras defektiem, kuri izraisa zondējošas gaismas izkliedi, piemēram, bloku struktūru, līdz ar to var secināt, ka paraugs ir mazāk kvalitatīvs. Tas vēlreiz apstiprina, ka pat paraugos, kuri izgatavoti no vienas monokristāliskas sagataves, var būt dažāds piemaisījumu un citu struktūras defektu saturs. No šiem pētījumiem atkal izriet secinājums, ka paraugiem, kuri izgatavoti no vienas monokristāliskās sagataves, ir dažāds piemaisījumu un defektu sastāvs.

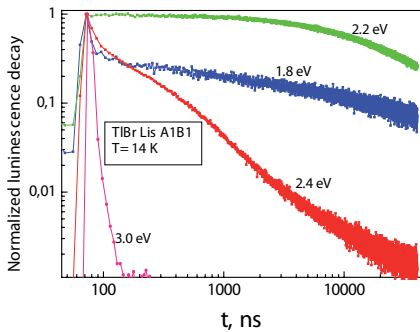
4.1.4 Fotoluminiscence šķidrā hēlija temperatūrā

TlBr eksitonu luminiscences dzēšana ir novērota temperatūrā, kas ir augstāka par šķidrā slāpekļa temperatūru. Taču eksitonu luminiscence ir ļoti atkarīga no kristāla kvalitātes – kristāliem ar lielu defektu saturu eksitonu luminiscence ir mazāk intensīva nekā kristāliem ar mazu defektu saturu. Lai iegūtu precīzāku informāciju par TlBr luminiscences spektriem (tiešie un netiešie eksitoni), šo spektru reģistrācijai izmantojam iekārtu ar iespēju dzesēt paraugu gandrīz līdz šķidrā hēlija temperatūrai (≈ 14 K).

Luminiscences spektri tika reģistrēti TlBr kristāliem pēc dažādiem apstrādes posmiem. Vispirms spektri tika reģistrēti pēc parauga nogriešanas – „as grown” (12. att.), tad pēc parauga presēšanas un kodināšanas – „pressed”. Paraugam A1B2 spektrs tika reģistrēts arī pēc parauga atkvēlināšanas – „pressed and annealed”. Presēšana tika izvēlēta, vadoties no apsvērumiem, ka TlBr ir ļoti plastisks materiāls, kuram pēc presēšanas iespējams iegūt gludu virsmu, taču presēšanas laikā kristāls tiek deformēts un tajā mainās defektu saturs.



12. att. Luminiscences spektri šķidra hēlija temperatūrā a) ar Bridžmena–Stokbargera, b) izkausētās kustīgās zonas metodi audzētiem TlBr kristāliem



13. att. Luminiscences dzišanas kinētikas šķidra hēlija temperatūrā ar Bridžmena–Stokbargera metodi audzētām paraugam A1B1

12. attēlā luminiscences spektri normēti tiešo eksitonu luminiscences joslā, kas dod iespēju vērtēt defektu luminiscences relatīvo ieguldījumu. Spektros varam izdalīt dažas luminiscences pamatjoslas: 1) josla pie 3.0 eV ir tiešo (taisnās pārejas) eksitonu luminiscence; 2) josla pie 2.6 eV ir netiešo (slīpās pārejas) eksitonu luminiscence; 3) josla pie 2.4 eV ir ar defektiem saistīta luminiscence; 4) josla pie 2.2 eV – piemaisījumu luminiscence un 5) josla pie 1.8 eV saistīta ar tallija koloīdu centriem.

Pētījumu rezultāti parāda, ka pēc deformācijas koloīdu centru koncentrācija palielinās, bet, kristālu atkvēlinot, šo centru koncentrāciju izdodas ievērojami samazināt. Ir zināms, ka koloīdu centri veidojas pie dislokācijām un uz graudu robežām. Deformācija būtiski palielina dislokāciju skaitu un attiecīgi arī koloīdu veidošanās efektivitāti. Pēc atkvēlināšanas koloīdu joslas intensitāte samazinās, kas nozīmē, ka atkvēlināšana noved pie dislokāciju (iespējams arī citu defektu) daudzuma samazināšanās.

13. attēlā ir parādītas luminiscences dzišanas kinētikas paraugam A1B1. Attēlā ir redzams, ka eksitonu luminiscences kinētikas (3.0 eV) ir ātras (<20 ns), bet defektu joslās kinētikas (1.8, 2.2, 2.4 eV) ir neeksponenciālas un lēnākas. Kinētiku neeksponencialitāte nozīmē, ka luminiscence rodas rekombinatīvā procesā, kurā iespējama lādiņnesēju migrācijas kavēšana, kā rezultātā jonizējošā starojuma detektoru darbības kvalitāte pasliktinās, jo lādiņnesēju savākšanas laiks palielinās un pasliktinās detektora izšķiršanas spēja – vismaz daļu no radionuklīdiem nevar detektēt. Kā tika konstatēts, detektors, kas izgatavots no kristāla M12, vispār nedarbojas.

4.2 TlBr kristāla virsmas īpašības

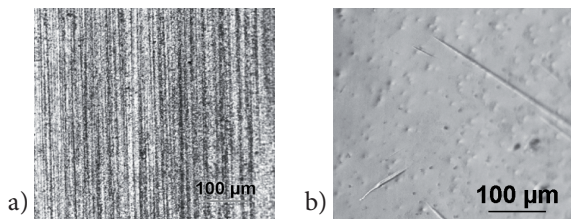
Jonizējošā starojuma detektoru izgatavošanas tehnoloģijā ietilpst kristālu virsmu sagatavošanas procedūras – kristāla griešana, pulēšana, kodināšana utt. Lai uz kristāla virsmas varētu kvalitatīvi uzklāt elektrovadošus kontaktus un lai šie kontakti būtu omiski, ir nepieciešams kvalitatīvi sagatavot detektora virsmu kontaktu uzputināšanai. Šīs sadaļas rezultāti ir publicēti rakstos {3, 4, 5,10}.

Lai no TlBr izgatavotu radiācijas detektoru, materiālu nepieciešams mehāniski apstrādāt. TlBr ir miksts materiāls, tādēļ mehāniskās apstrādes laikā materiālā ir iespējamās ievērojamas deformācijas un materiālā tiek ģenerēti dažādi virsmas un tilpuma struktūras defekti – dislokācijas, vakances un citi. Atkarībā no apstrādes tehnoloģijas, stipri defektētā virsmas slāņa dziļums var mainīties no 10 mikrometriem līdz vienam milimetram, vai pat dziļāk. Tādēļ viens no darba specifiskajiem mērķiem bija izstrādāt tādu virsmas apstrādes tehnoloģiju, kura ļautu iegūt bezdefektu virsmu, kas ir ļoti aktuāla problēma detektoru kristālu sagatavošanā. Virsmas kvalitātes kontrolei izvēlējāmies mikrociētības mērījumus un optiskās mikroskopijas metodi. Mikrociētība ir struktūrjutīga metode priekš defektu klātbūtni.

Eksperimentos izmantoti ar Bridžmena-Stokbargera metodi audzēti TlBr monokristāliski paraugi, sērijas A, L un S. Visu paraugu biezums bija 2 mm un laukums 5x5 mm². Mikrociētības mērījumiem par indentoru izmantoja Vikersa piramīdu. Mikrociētību H_v aprēķināja saskaņā ar metodiku, kas aprakstīta sadaļā 3.2. Pētāmie kristāli tika griezti, izmantojot dimanta stiepli. Parauga virsma pēc griešanas ir attēlota 14. att a, kur ir redzamas griešanas pēdas švīku veidā.

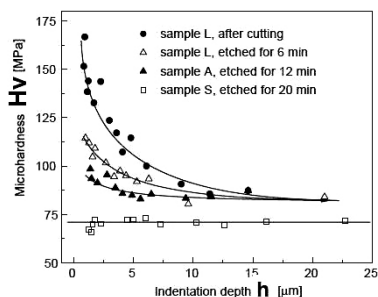
Virsmas mikrociētības mērījumi pēc griešanas parādīja, ka virsmas mikrociētība grieztam paraugam ir paaugstināta un sasniedz 160 MPa salīdzinājumā ar 75–80 MPa nedeformētam paraugam (15. att.). Rezultāti rāda, ka pēc griešanas cietinātā slāņa dziļums ir vismaz 20 μm , bet ar defektiem bagātā slāņa dziļums ir vēl lielāks.

Mūsu eksperimentos defektētais slānis tika novākts ar ķīmisku kodināšanu. Tika sagatavots kodinātājs, kas sastāv no etilspirta un broma porcijā 10:1.

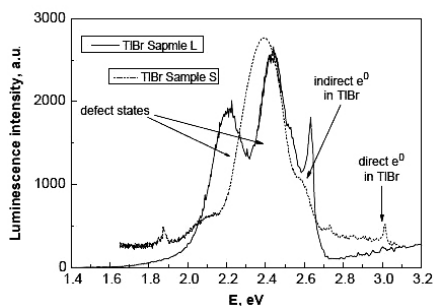


14. att. TlBr attēli optiskajā mikroskopā pēc griešanas (a) un pēc 20 min ķīmiskas kodināšanas (b)

Rezultāti par cietinātā slāņa biezumu atkarībā no ķīmiskās kodināšanas posmiem redzami 15. attēlā. 6 un 12 minūšu ilga kodināšana samazināja mikrociētību, tomēr pēc šīm kodināšanām kristāla virsmas defektētais slānis pilnībā vēl nav aizvākts. Pilnīgi defektēta slāņa aizvākšana prasa 20 minūšu ilgu kodināšanu. Kodinātā virsma ir gluda un tikai ar dažiem mikroskopā pamanāmiem defektiem (14. att. b). Iegūtie rezultāti parādīja, ka piedāvātais virsmas apstrādes paņēmieni dažādu sērīju paraugiem (A, L un S) ļauj iegūt topogrāfiski kvalitatīvu virsmu, kā arī homogēnu mikrociētību ar labu virsmu kvalitātes atkārtojāmību.



15. att. TlBr virsmas mikrociētība atkarībā no indentēšanas dziļuma pēc dažādām virsmas apstrādēm



16. att. Luminiscences spektri ($T=14\text{ K}$) paraugam L pēc 12 min un paraugam S pēc 20 min ilgas ķīmiskās kodināšanas

Kā ir zināms, luminiscentā metode ir jutīga un tiek lietota dažādu tipu defektu noteikšanai [10]. 12 un 20 minūtes ilgi ķīmiski kodinātu TlBr kristālu

luminiscences spektri ir redzami 16. attēlā. Spektri tika reģistrēti 14 K temperatūrā, paraugu ierosinot ar lāzeru (4.66 eV). No spektriem ir redzams, ka paraugā S ir novērojama tiešā eksitona luminiscence (3 eV), kamēr paraugā L tā nav, kas ir skaidrojams ar to, ka paraugam L nav pilnībā nokodināts defektētais virsmas slānis un eksitoni, nokļūstot šajā slānī, rekombinē bezizstarojuma procesā.

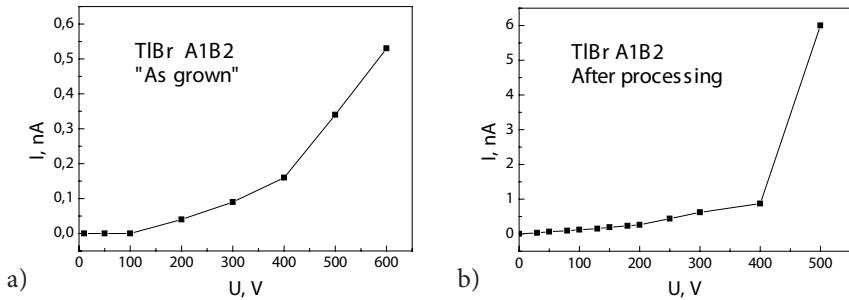
Pētījuma praktiskais rezultāts ir TlBr kristālu virsmas apstrādes tehnoloģija, kura ļauj sagatavot kristālu ar topoloģiski labām virsmām detektora izgatavošanai. Mehāniski defektēto slāni var gandrīz pilnībā aizvākt ar ķīmisko kodināšanu, virsmas kvalitātes kontrolei izmantojot mikrocietības un optiskās mikroskopijas metodi. Dažādu paraugu (A, L un S) salīdzinājums rāda, ka atšķirībām mikrocietības vērtībās dažādām monokristālu sērijām nav noteicošā loma detektoru raksturīpašībās. Taču defektētā paaugstinātas cietības virsmas slāņa aizvākšana ir nepieciešams sagatavošanas posms radiācijas detektoru ražošanas tehnoloģijā. Piemēram, lai uzputinātu kvalitatīvus zelta kontaktus, virsmas kvalitāte ir ļoti svarīgs parametrs. Lai nodrošinātu omiskus kontaktus ar labu adhēziju, nepieciešams, lai uz virsmas nebūtu piesārņojumu un lai tā būtu optiski gluda. Šīs prasības tiek izpildītas, ja izmanto aprakstīto TlBr ķīmisko kodināšanu.

4.3 TlBr kristāla elektriskās īpašības

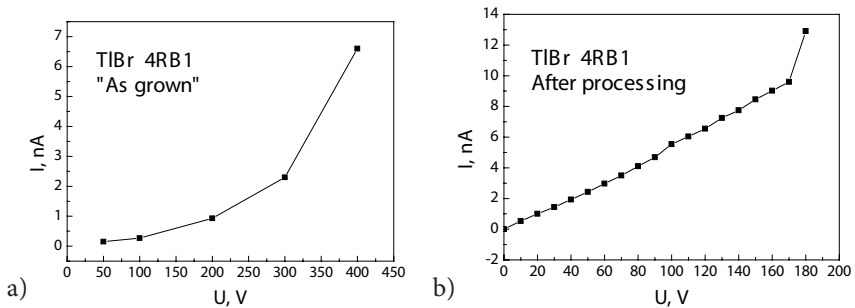
Materiāla elektriskās īpašības ir ļoti svarīgas detektoru darbībā. Pētot TlBr elektriskās īpašības, tika izmantoti ar Bridžmena–Stokbargera metodi audzētu kristālu paraugi, kā arī paraugi, kuri audzēti ar izkausētās kustīgās zonas metodi. Pirms zelta kontaktu uzklāšanas notika parauga virsmas apstrāde – paraugs vispirms tika presēts un pēc tam tā virsmas tika kodinātas. Parauga atkvēlināšanu veica pirms kontaktu uzputināšanas. Pirms presēšanas paraugu biezums bija 2 mm, bet presēšanas rezultātā tas samazinājās līdz 0.5 mm un bija visiem paraugiem vienāds. Taču katras sērijas vienam nepresētam paraugam arī tika uzputināti kontakti, lai varētu salīdzināt īpašības paraugiem pirms un pēc to presēšanas. Pirms un pēc presēšanas paraugiem tika uzņemtas voltampēru raksturliknes istabas temperatūrā. Voltampēru raksturlikņu uzņemšanai paraugam tika uzputināti zelta kontakti, un pie tiem ar zelta zondēm pielikts spriegums. Visa mērīšanas procedūra realizēta „melnajā kastē” – mērīšanas laikā paraugs atradās tumsā, lai novērstu fotostrāvas ieguldījumu. Attēlos 17, 18 ir parādīta radiācijas detektoru izgatavošanai sagatavoto TlBr kristālu voltampēru raksturliknes.

Līdz presēšanai visiem paraugiem voltampēru raksturliknes nebija lineāras (17. att. a, 18. att. a), bet pēc presēšanas, atkvēlināšanas un kodināšanas voltampēru raksturlikne visiem paraugiem ir lineāra (17. att. b, 18. att. b). Tomēr paraugam 4R raksturlikne ir stāvāka un caursites spriegums 170 V, tajā pašā laikā, kad paraugam A1B2 pie tā paša biezuma caursites spriegums ir 400 V. Lai novērtētu, kā presēšana ietekmē paraugu elektriskās īpašības, no iegūtām

voltampēru raksturliķnēm tika aprēķināta detektoru kristālu īpatnējā pretestība, aprēķinu rezultāti apkopoti tabulā 2.



17. att. Voltampēru raksturliķnes ar Bridžmena-Stokbargera metodi audzētām TlBr kristālam: a) nepresētām un b) presētām



18. att. Voltampēru raksturliķnes ar izkausētās kustīgās zonas metodi audzētām TlBr kristālam a) nepresētām un b) presētām

No tabulas 2 ir konstatējams, ka paraugam A1B2 īpatnējā pretestība praktiski nemainījās pēc presēšanas, bet paraugam 4RB1 īpatnēja pretestība izmainījās par vienu decimālo kārtu. Varam pieļaut, ka paraugs 4RB1 satur struktūras defektus – dislokācijas, plaisas, graudu robežas, kuras izraisa „melnās” strāvas noplūdi kā pirms apstrādes, tā arī pēc apstrādes.

Tabula 2. Paraugu īpatnējā pretestība (ρ , $\Omega \cdot \text{cm}$)

Paraugš	A1B2	4RB1
Pirms apstrādes	$8,2 \times 10^{12}$	$3,7 \times 10^{11}$
Pēc apstrādes (presēšana, kodināšana)	2×10^{12}	$4,5 \times 10^{10}$

Kristāla presēšana pirms kodināšanas un kontaktu uzklāšana būtiski ietekmē radiācijas detektoru kristālu voltampēru raksturliķni un maina īpatnējās pretestības vērtību.

5. Jonizējošā starojuma detektoru izgatavošana

Detektoru īpašību testēšanai un to iespējamai izmantošanai veltīti daži publicētie darbi {8, 9, 11}, kuros izklāstīta detektoru izgatavošanas tehnoloģija un spektrometrisko parametru testēšanu.

5.1 Detektoru izgatavošanas tehnoloģija

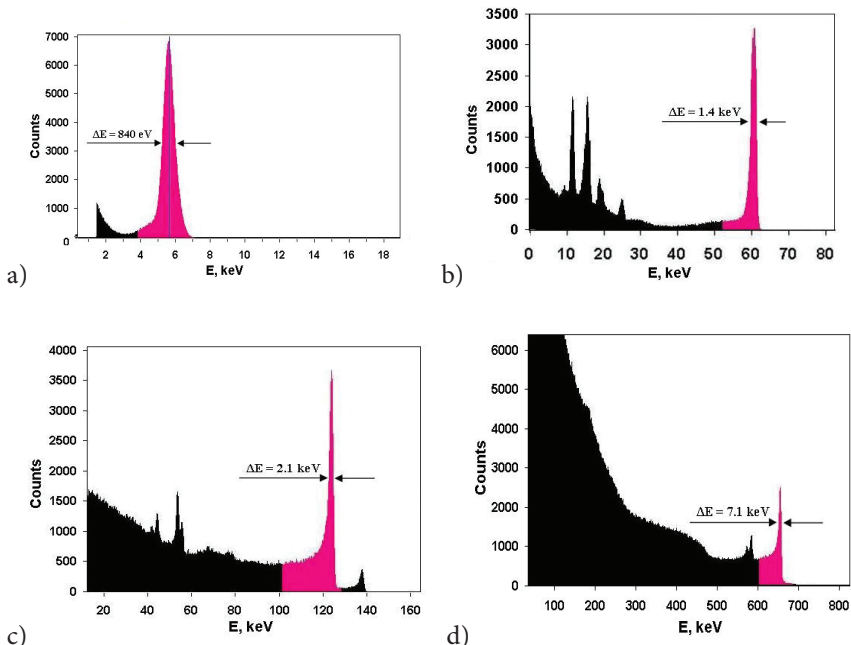
Lai izgatavotu jonizējošā starojuma detektoru, jārealizē dažādas tehnoloģiskā cikla operācijas. Operāciju secība detektora izgatavošanas tehnoloģijā ir šāda:

- Sākotnējā monokristāliskās sagataves sagriešana plāksnēs
- Griešana vajadzīgās konfigurācijas gabalos ar uzdotiem izmēriem
- Pulēšana
- Kodināšana
- Atkvēlināšana
- Zelta kontaktu uzputināšana vakuumā
- Fotolitogrāfija (ja ir nepieciešami saliktie kontakti, piemēram, pikseļa detektoriem)

5.2 Spektrometriskās īpašības gamma staru detektoriem, izgatavotiem no kristāliem, kas audzēti ar Bridžmena-Stokbargera metodi

Jonizējošā starojuma detektors ir izgatavots no ar Bridžmena-Stokbargera metodi audzēta kristāla Al un reģistrētas tā spektrometriskās īpašības, kuras redzamas 19. attēlā.

Testēšanas laikā ir iegūti sekojoši rezultāti par detektora spektrometriskajām īpašībām (detektoru izšķiršanas spēja): 0.8 (13.6%), 1.4 (2.3%), 2.1 (1.7%) un 7.1 keV (1.1%) attiecīgi pie enerģijas 59.6, 59.6, 122, un 662 keV. Detektora kontaktu platība 12.56 mm² un kristāla biezums ir 2 mm. Kā varam redzēt attēlos, visos spektros ir palielināts fona līmenis, kas ir saistīts ar kontaktu nepilnīgu uzklāšanu uz detektora virsmas – daļa kristāla virsmas nav nosepta ar kontaktu. Kontaktu malās elektriskais lauks ir nehomogēns, un rezultātā lādiņnesēju savākšanas laiks palielinās. Šis efekts ir vairāk izteikts, detektējot kvantus ar lielām enerģijām, kad lādiņnesēju savākšana notiek no visa detektora tilpuma, nevis tikai no pievirsmas apgabala, kā pie zemām enerģijām. Tāds efekts ir novērots arī CdZnTe (CZT) detektoros gan ar pilnīgi uzklātiem kontaktiem, gan arī nē. Ja detektora virsmai kontakti uzklāti pilnībā, tad fona līmenis samazinās.



19. att. Jonizējošā starojuma spektri reģistrēti ar no TlBr izgatavotiem detektoriem, kuru kristāli audzēti Bridžmena-Stokbargera metodi a) Fe-55, b) Am-241, c) Co-57, d) Cs-137

No kristāla A1 izgatavotā detektora spektrometriskie parametri apkopoti tabulā 3. Pašlaik vislabākie rezultāti iegūti no kristāla A1 izgatavotajiem planāriem TlBr detektoriem [20–25].

Tabula 3. Dažu TlBr un CZT jonizējošā starojuma detektoru spektrometrisko īpašību salīdzināšana (FWHM – pīķa platums pusaugstumā)

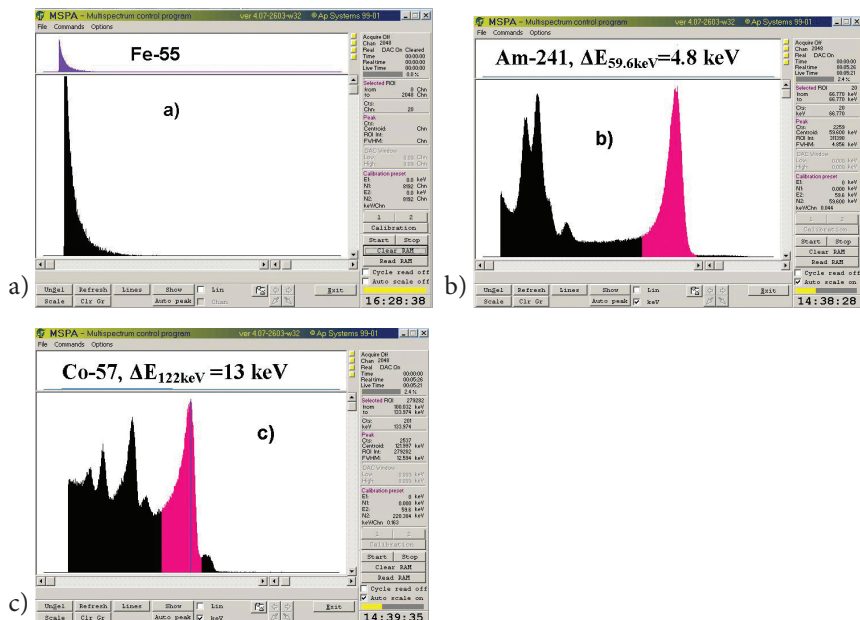
Kristāls	5.9 keV	59.6 keV	122 keV	662 keV
	FWHM, keV			
TL-1	0.5	2.7	4.4	29
Lis25	0.85	1.8	3.1	21.1
A1	0.8	1.4	2.1	7.1
4R		4.8	13	
CdZnTe	1.1	1.9	3	12

Šie spektrometriskie parametri demonstrē, ka labi un pieņemami rezultāti tika sasniegti, pateicoties kristālu audzēšanas un detektoru izgatavošanas

tehnoloģiju uzlabošanai. Piemēram, SIA BSI tika izgatavoti pirmie planārie TLBr detektori [23] no kristāla TL-1 (tab. 1), kuri tobrīd bija labākie pasaulē. Bet tagad, kā tas redzams no tabulas 3, detektors izgatavots no kristāla Al ir vislabākais un pašreiz pārspēj sērijveidā ražotos CZT detektorus [4]. Tas nozīmē, ka detektoru izgatavošanā no TLBr ir panākts progress, pateicoties kristālu audzēšanas un detektoru izgatavošanas tehnoloģijas uzlabojumiem {10}. No pēdējā laikā iegūtiem kristāliem izgatavotie detektori uzrāda atkārtojamas raksturīpašības. Īpatnējā pretestība ir ap $(3-5) \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ un kustīguma-dzīveslaika ($\mu\tau$) parametra vērtības elektroniem un caurumiem ir $\approx 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}$.

5.3 Spektrometriskās īpašības gamma staru detektoriem, kas izgatavoti no ar izkausētās kustīgās zonas metodi audzēta TLBr kristāla

No TLBr kristāliem, kas audzēti ar izkausētās kustīgās zonas metodi, arī tika izgatavoti jonizējošā starojuma detektori un pārbaudītas to spektrometriskās īpašības. Iegūtie rezultāti ir parādīti 20. attēlā.



20. att. Jonizējošā starojuma spektri reģistrēti ar no TLBr izgatavotiem detektoriem, no kristāliem audzētiem ar izkausētās kustīgās zonas metodi, paraugs 4R a) Fe-55, b) Am-241, c) Co-57

Spektrometriskās raksturīpašības reģistrētas temperatūrā -10°C , un pieliktais spriegums ir 580 V. Iegūtas sekojošas izšķiršanas spējas: 4.8 keV pie 59.6 keV un 13 keV pie 122 keV. Ja salīdzina ar detektoriem, izgatavotiem no ar Bridžmena-Stokbargera metodi audzētiem kristāliem (tab. 3), varam secināt, ka detektora izšķirtspēja nav pietiekama, lai šo detektoru varētu plaši izmantot, tomēr kristāli uzrāda spektrometriskās īpašības. Šajā gadījumā noteicošā loma ir kristālu kvalitātei, un tas nozīmē, ka jāturpina strādāt pie izkausētās kustīgās zonas metodes turpmākas attīstības TlBr kristālu audzēšanai. Iespējams, ka izkausētās kustīgās zonas metode jālieto vairākkārt, katru reizi atdalot izaudzētā kristāla galus, kuros uzkrājas nekontrolējamie piemaisījumi. Tāpat nav izslēdzams, ka jāturpina attīstīt jonizējošā starojuma detektoru izgatavošanas tehnoloģijas, piemēram, izvēloties atkvēlināšanai speciālus režīmus vai modificējot citas tehnoloģiskā procesa parametrus.

6. Optisko un elektrisko īpašību korelācija ar detektoru raksturīpašībām

Darbā gaitā tika salīdzinātas TlBr kristālu optiskās īpašības ar to jonizējošās radiācijas detektoru spektrometriskajām īpašībām, kuri izgatavoti no šiem kristāliem. Salīdzināšanas rezultātā iegūti šādi secinājumi:

- Jods un citi homologiskie piemaisījumi pasliktina jonizējošā starojuma detektoru raksturīpašības, un tādi kristāli nav lietojami detektoru izgatavošanai. Homoloģiskos piemaisījumus var konstatēt pēc fundamentālās absorbcijas malas novietojuma un kristālu luminiscences.
- Detektori, kas izgatavoti no kristāliem, kuros efektīvi rodas koloīdi, ir ar īsu darba mūžu.
- Voltampēru raksturliiknes linearitāte un kristāla augsta īpatnējā pretestība ($\approx 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$) ir detektoru darbības nepieciešamie nosacījumi. Ar izkausētās kustīgās zonas metodi audzētiem TlBr kristāliem voltampēru raksturliikne ir stāvāka un caursites spriegums ir mazāks nekā ar Bridžmena-Stokbargerera metodi audzētiem TlBr kristāliem.

7. Aizstāvāmās tēzes

1. Parādīts, ka TlBr kristālu dažas optiskās īpašības korelē ar no tiem izgatavoto jonizējošā starojuma detektoru spektrometriskām īpašībām, līdz ar to iespējama optisko īpašību kontrole, lai noteiktu kristāla piemērotību jonizējošā starojuma detektora izgatavošanai {1, 2}.
2. Izstrādāta un tiek izmantota detektoru izgatavošanai nepieciešamā TlBr kristāla virsmas apstrādes metodika, kas nodrošina kvalitatīvas elektriskā kontakta īpašības sistēmā Au-TlBr. Metodika ietver TlBr virsmas kodināšanu, kristāla atkvēlināšanu un apstrādes rezultātu kontroli, izmantojot optisko mikroskopiju un mikrocietības datus {3, 4}.
3. Novērota TlBr kristālu voltampēru raksturliknes atkarība no kristāla audzēšanas metodes un virsmas apstrādes metodikas. Parādīts, ka materiāla augsta īpatnējā pretestība un voltampēru raksturliknes linearitāte nosaka no kristāla izgatavotā jonizējošās radiācijas detektora parametrus {8}.
4. No TlBr kristāliem, kas audzēti ar divām atšķirīgām metodēm, izgatavoti elektromagnētiskā jonizējošā starojuma (rentgenstari, gamma stari) detektori un salīdzinātas šo detektoru īpašības. Labākajam no tiem enerģijas izšķirtspējas ir 0.8 (13,6%), 1.4 (2,3%), 2.1 (1,7%) un 7.1 keV (1,1%) atbilstoši enerģijām 5.9, 59.6, 122 un 662 keV. Iegūtie parametri ir labāki par parametriem, kurus uzrāda plaši lietojamie CdZnTe detektori {8, 9}.

8. Literatūras saraksts

1. A. Owens, A. Peacock, Compound semiconductor radiation detectors, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **531**, 1-2, 21 (2004), 18.
2. Под ред. М.П. Шаскольской, Акустические кристаллы, Наука, Москва, (1982).
3. D. A. Pinnow, A. L. Gentile, A. G. Standlee, A. J. Timper, L. M., Hobrock, Polycrystalline fiber optical waveguides for infrared transmission, *Appl. Phys. Let.*, **33** (1), (1978), 28.
4. A. Owens, A. Peacock, M. Bavdaz, "Progress in Compound Semiconductors", *X-Ray and Gamma-Ray Telescopes and Instrum. for Astron.*, **4851**, (2003), 1059.
5. Д. К. Миллерс, А. В. Номоев, Л. Г. Григорьева, Точечные радиационные дефекты в галогенидах таллия, *Изв. АН Латв. Сер. Физ. и техн. н.*, **3**, (1989), 60.
6. Л. Г. Григорьева, Д. К. Миллерс, Е. А. Котомин, Люминесценция смешанных кристаллов галогенидов серебра при высоких плотностях возбуждения, *Журнал прикладной спектроскопии*, **55**, (1991), 826.
7. Т. Х. Джеймс, Теория фотографического процесса, «Химия», Ленинград (1984).
8. Л. Г. Григорьева, Д. К. Миллерс, Е. А. Котомин, В. Г. Артюшенко, А. В. Номоев, Короткоживущие радиационные дефекты в галогенидах серебра, *Оптика и спектроскопия*, **67**, (1989), 3.
9. M. Ueta, H. Kanzaki, K. Kobayashi, Y. Toyozawa, E. Hanamura, *Exitonic Processes in Solids*, Springer-Verlag, Hiedelburg, New York, Tokio 1984.
10. R. Shimizu, T. Kōda and T. Murahashi, Exciton Luminescence in TlBr and TlCl, *J. Phys. Soc. Jpn.* **36** (1974), 161.
11. V. Kohlová, I. Pelant, J. Hála, M. Ambrož, K. Vacek, Luminescence of direct- and indirect-gap electron-hole plasma in TlBr, *Sol. St. Com.*, **62**, 2, (1987), 105.
12. А. С. Высочанский, О фотолюминесценции хлористого таллия – *Доклад АН СССР*, **112**, (1957), 228.
13. В. А. Соколов, Н. А. Толстой, О природе люминесценции хлористого таллия, *Оптика и спектроскопия.*, **18**, (1965), 251.
14. В. А. Соколов, Люминесценция хлористого таллия, *Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук*, Москва, 1963.
15. H. Overhov, J. Treusch, *Solid State Commun*, **9**, (1971), 53.
16. И. В. Белевич, Е. А. Котомин, А. Л. Шлюгер, Р. А. Эварестов, Расчёт электронной структуры хлорида таллия, *Изв. АН Латв. Сер. Физ. и техн. н.* (1986).

17. Л. Г. Григорьева, Процессы создания и рекомбинации радиационных дефектов в галогенидах таллия и щелочных металлов, *Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата физ.-мат. наук*, Рига (1986).
18. M. Kurik, Urbah Rule, *Phys Stat. Sol.* (a) **8**, (1971), 9.
19. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. Под ред. Ю. К. Акимова, Энергоиздат, Москва 1989.
20. M. S. Kouznetsov, I. S. Lisitsky, S. I. Zatoloka, V. V. Gostilo, Development of the technology for growing TlBr detector crystals, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **531**, 1-2, (2004), 174.
21. I. S. Lisitsky, M. S. Kouznetsov, Y. A. Sultanova, Optical characteristics of TlBr crystals grown in various ambient, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **591**, 1, (2008), 213.
22. Hitomi, K., Muroi, O., Matsumoto, A., Shoji, T., Hiratate, Y. Large-volume thallium bromide detectors for gamma-ray spectroscopy, *IEEE Trans. Nucl. Sci*, **48**, 6 (2001), 2313.
23. V. Gostilo, A. Owens, M. Bavdaz, I. Lisjutin, A. Peacock, H. Sipila, S. Zataloka, Single and Pixel Arrays Based on TlBr, Nuclear Science, *IEEE Trans. Nucl. Sci*, **41**, (2002), 2513.
24. I. B. Oliveira, F. E. Costa, P. K. Kiyohara, M. M. Hamada, Influence of Crystalline Surface Quality on TlBr Radiation Detector Performance, *IEEE Trans. Nucl. Sci*, **52**, 5, (2005), 2058.
25. D. Zhou, L. Quan, X. Chen, S. Yu, Z. Zheng, S. Gong, Preparation and characterizations of thallium bromide single crystal for room temperature radiation detector use, *Journal of Crystal Growth*, **311**, 8, (2009), 2524.
26. S. Yu, D. Zhou, S. Gong, Z. Zheng, Y. Hu, C. Wang, L. Quan, Purification and optical properties of TlBr crystals, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **602**, 2, (2009), 484.
27. K. Hitomi, T. Onodera, T. Shoji, Y. Hiratate, H. Zhong, TlBr Gamma-Ray Spectrometers Using the Depth Sensitive Single Polarity Charge Sensing Technique, *IEEE Trans. Nucl. Sci*, **55**, 3-3, (2008), 1781.
28. V. M. Zaletin, I. P. Barkov, I. M. Gazizov, V. S. Khrunov, I. S. Lisitskii and M. S. Kuznetsov, Use of TlBr crystals for x- and γ -ray detectors, *Atomic Energy*, **106**, 4, (2009), 214.

8.1 Autora publicētie darbi par promocijas tēmu

1. L. Grigorjeva, D. Millers, M. Shorohov, I. S. Lisitskii, M. S. Kuznetsov, S. Zatoloka, V. Gostilo, Optical investigations of TlBr detector crystals, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **531**, 1-2, (2004), 197–201.

2. M. Shorohov, L. Grigorjeva, D. Millers, Optical properties and spectrometric performance of TlBr detector crystals, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A* **563**, 1, (2006), 78–81.
3. M. Shorohov, F. Muktepavela, L. Grigorjeva, J. Maniks, D. Millers, Surface processing of TlBr single crystals used for radiation detectors, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A* **607**, 1, (2009), 120–122.
4. M. Shorohov, F. Muktepavela, J. Maniks, Surface processing of TlBr crystals for X- and γ -ray detectors, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, **3**, (2008), 13–19.
5. V. Kozlov, H. Andersson, V. Gostilo, M. Leskelä, A. Owens, M. Shorohov, H. Sipilä, Improved process for the TlBr single-crystal detector, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **591**, 1, (2008), 209–212.
6. P. Kostamo, M. Shorohov, V. Gostilo, H. Sipilä, V. Kozlov, I. Lisitsky, M. Kuznetsov, A. Lankinen, A.N. Danilewsky, H. Lipsanen, M. Leskelä Characterization of TlBr for X-ray and γ -ray detector applications, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **607**, 1, (2009), 129–131.
7. V. Kažukauskas, A. Ziminskij, J.-V. Vaitkus, V. Gostilo, M. Shorohov, Photoelectrical properties of TlBr related to ionic transport and presence of defects, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **607**, 1, (2009), 123–125.
8. M. Shorohov, M. Kouznetsov, I. Lisitskiy, V. Ivanov, V. Gostilo, A. Owens, Recent Results in TlBr Detector Crystals Performance, Nuclear Science, IEEE Trans. Nucl. Sci. **56**, 4, 1, (2009), 1855–1858.
9. M. Shorohov, V. Gostilo, V. Ivanov, A. Owens, Probe prototypes based on TlBr detectors, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **607**, 1, (2009), 116–119.
10. V. Kozlov, H. Andersson, V. Gostilo, M. Kemell, P. Kostamo, M.S. Kouznetsov, M. Leskelä, H. Lipsanen, I.S. Lisitsky, M. Shorohov, H. Sipilä, Improvements and problems of Bridgman–Stockbarger method for fabrication of TlBr single crystal detectors, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **607**, 1, (2009), 126–128.
11. A. Kozorezov, V. Gostilo, A. Owens, F. Quarati, M. Shorohov, M. A Webb, J. K. Wigmore, Polarization effects in thallium bromide x-ray detectors *Journal of Applied Physics*, **108**, (2010), 64507–64507-10.

8.2 Autoru publicētie darbi par citām tēmām

1. M. Shorohov, I. Tsirkunova, A. Loupilov, V. Gostilo, C. Budtz-Jørgensen, I. Kuvvetli, Performance updating of CdZnTe strip-drift detectors, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **576**, 1, (2007), 80–82.
2. A. Bulycheva, M. Shorohov, A. Lupilov, V. Gostilo, W. Inui, M. Funaki, CdTe linear arrays for registration of hard gamma-ray fluxes, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **607**, 1, (2009), 107–109.

10. Dalība zinātniskās konferencēs

- 5th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, Riga, Latvia September 7–11, 2003.
- 7th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, Grenoble, France, July 4–7, 2005.
- 8th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, Pisa, Italy, July 2–6, 2006.
- 9th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, Erlangen, Germany, July 22–26, 2007.
- 10th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, Helsinki, Finland, June 29–July 3, 2008.
- 12th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, Erlangen, Germany, July 11–15, 2010.
- 16th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop, Dresden, Germany, October 19–25, 2008
- LU CFI, 22.-25 Zinātniskās konferences (2007–2010) .

Pateicība

Īpašs paldies Larisai Grigorjevai par lielo atbalstu zinātniskā darba tapšanā un konstruktīvām diskusijām, kritiku zinātnisko rezultātu apspriešanā.

Vēlos izteikt arī pateicību LU Cietvielu Fizikas institūta kolēģiem: K. Šmitam, F. Muktepāvelai, J. Manikam, I. Manikai, kā arī SIA „BSI” kolēģiem un prezidentam V. Gostilo.

Darbs tapis, pateicoties Eiropas Sociālā Fonda finansiālajam atbalstam.





Zelta Rudens
tipogrāfija