

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte
Tehniskās fizikas institūts

Edvīns DAUKŠTA
Doktora studiju programmas „Materiālzinātne” doktorants

**KADMIJA CINKA TELURĪDA FIZIKĀLO PARAMETRU
OPTIMIZĀCIJA AR NANOSEKUNŽU LĀZERU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Profesors, Dr. habil. phys.,
ARTŪRS MEDVIDS

Zinātniskais vadītājs
Docents, Dr. phys.,
ALEKSANDRS MIČKO

Rīga 2015

Daukšta E. Kadmija cinka telurīda fizikālo parametru optimizācija ar nanosekunžu lāzeru. -R.:RTU, 2015.-33 p.

Iespiests saskaņā ar TFI 2015. g. 28. maija lēmumu, protokols Nr.6



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu.

ISBN 978-9934-542-10-7

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS FIZIKAS DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS
TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs fizikas doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. g. 9. septembrī Rīgas Tehniskās universitātes Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātē, Paula Valdena ielā 3., 272. k.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr. habil. phys. Andris Ozols
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr. habil. phys. Uldis Rogulis
Latvijas Universitāte

Dr. phys. Laima Trinklere
Latvijas Universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē fizikas doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Edvīns Daukšta

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, literatūras apskatu, eksperimentālo daļu, rezultātus un izvērtējumu, secinājumus, literatūras sarakstu, 53 attēlus, kopā 99 lappuses. Literatūras sarakstā ir 114 avoti.

PATEICĪBA

Vēlos izteikt pateicību visiem, kas tiešā vai netieša veidā man ir palīdzējuši promocijas darba izstrādē.

Pirmkārt, vēlos pateikties saviem darba vadītājiem profesoram Dr. habil. phys. Artūram Medvidam un docentam Dr. phys. Aleksandram Mičko par sapratni un atbalstu doktorantūras laikā. Paldies par iedvesmu strādāt zinātnē.

Vēl es gribētu izteikt pateicību maniem kolēģiem no laboratorijas par atsaucību un atbalstu.

Vēlos pateikties saviem kolēģiem no Tehniskās fizikas institūta par palīdzību un vērtīgajiem padomiem.

Vēlos arī pateikties pētniekiem no Crystal Growth Laboratory, Universidad Autónoma de Madrid, Spānija un Sia Ritec par CdZnTe paraugiem. Kā arī vēlos pateikties visiem vietējiem un ārzemju zinātniekiem, kas palīdzēja mērījumu veikšanā un analīze.

Īpaša pateicība Janai par atbalstu un sapratni.

Visbeidzot, vēlos pateikties savai ģimenei un draugiem par iedrošināšanu un pacietību.

SATURS

Anotācija	6
Annotation.....	7
1. Ievads	8
2. Literatūras pārskats	10
3. Eksperimentālās metodes	13
4. Rezultāti un to izvērtējums.....	14
4.1. Radiācijas izturība.....	14
4.2. CdTe/CdZnTe heterostruktūras veidošana.....	17
4.3. CdZnTe radiācijas detektora parametru uzlabošana	19
Secinājumi.....	24
Aizstāvamās tēzes	25
Publikācijas	26
Konferences.....	27
Citas publikācijas	28
Literatūras avoti	32

ANOTĀCIJA

Šis promocijas darbs ir veltīts nanosekunžu lāzera starojuma iedarbības izpētei uz CdZnTe kristālu fizikālajām īpašībām. Promocijas darba mērķis ir izpētīt CdZnTe fizikālās īpašības pēc apstarošanas ar lāzeru pie dažādiem parametriem: viļņa garums, impulsa garums, intensitāte un doza. Praktiskais promocijas darba pielietojums sevī ietver lāzer tehnoloģijas izstrādi pielietojumam radiācijas detektoru ražošanā.

Darbā pierādīts, ka CdZnTe kristāls ir izturīgāks pret γ -starojumu pēc apstarošanas ar stipri absorbējamu lāzera starojumu. Tas notiek pašdefektu ģenerācijas un to telpiskās pārdalīšanās dēļ. Darbā tiek skaidrots CdZnTe kristāla γ -starojumu izturības mehānisms. Kā arī tika pierādīts, ka augstas intensitātes stipri absorbējams lāzera starojums izraisa CdTe/CdZnTe heterostruktūras veidošanos, šis efekts tiek pamatots ar cinka atomu dreifu kristāla tilpumā un kadmija atomu pārvietošanos virsmas virzienā temperatūras gradientā. Turklāt, lai samazinātu nevēlamo piemaisījumu koncentrāciju un izšķīdinātu indija sekundārās fāzes, var izmantot vāji absorbējamu lāzera starojumu, kas apkārt telūra ieslēgumiem izveido temperatūras gradientu.

Eksperimentālie rezultāti un to izvērtējums tiek pamatoti ar zinātniskās literatūras datiem.

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā un satur 99 lapaspuses. Promocijas darbā ir iekļauti 53 attēli, 6 tabulas, 51 formula un 114 atsaucis uz literatūru.

ANNOTATION

Comprehensive study of pulsed laser influence on CdZnTe crystals and their physical properties after irradiation by the nanosecond laser is presented in this dissertation. The main focus of dissertation is to investigate dependence of laser parameters on the physical properties of the CdZnTe crystal: different wavelength, pulse duration, intensity and dose. The practical significance of this dissertation is to develop laser technology for CdZnTe crystal preparation for radiation detector applications.

It was proven that CdZnTe crystal sustain γ -radiation better after preirradiation with highly absorbing laser. This is due to the generation and redistribution of intrinsic point defects in temperature gradient field. The mechanism of CdZnTe γ -radiation hardness enhancement is proposed. Moreover, it was proven that high intensities of highly absorbing laser radiation lead to the formation of CdTe/CdZnTe heterostructure and the effects are based on the drift of zinc atoms in to the volume of the crystal and cadmium to the surface due to the temperature gradient field. Furthermore, it is possible to reduce residual impurities and dissolve indium secondary phases by weakly absorbing laser radiation due to the generation of temperature gradient field around tellurium inclusions.

Experimental results are discussed and explained in context of scientific literature.

The thesis is written in English, its volume is 99 pages. The dissertation includes 53 figures, 6 tables, 51 equations and 114 references.

1. IEVADS

CdZnTe tiek plaši lietots x-starojuma un γ -starojuma detektoros, infrasarkanajos detektoros un saules elementos [1]–[3]. CdZnTe fizikālās īpašības pieļauj šī materiāla izmantošanu jonizējošo un nejonizējošo starojumu detektēšanai: liela atommasa (Z), relatīvi plaša aizliegtā zona, kas nodrošina augstu pretestību un līdz ar to mazu tumsas strāvu. Turklāt, CdZnTe piemīt lielāka radiācijas izturība nekā CdTe [4].

Lai izveidotu kvalitatīvu radiācijas detektoru ir nepieciešams liela apjoma kristāls ar zemu defektu koncentrāciju, augstu tīrību un homogēnu komponentu sadalījumu. Diemžēl, ir grūti iegūt CdZnTe kristālu bez nevēlamiem piemaisījumiem un defektiem. Šie defekti un piemaisījumi viegli veidojas kristālu augšanas procesā un no tiem ir samērā grūti atbrīvoties ar pēcapstrādes metodēm. CdZnTe audzēšanas tehnoloģijas attīstās samērā lēni, neskatoties uz to ka CdZnTe ir samēra zema kušanas temperatūra. Neskatoties uz plašo šī materiāla pielietojumu, pastāvošās problēmas ir saistītas ar grūtībām iegūt homogēnu komponentu sadalījumu brīvu no strukturālajiem defektiem.

Moderno CdZnTe kristālu audzēšanas tehnoloģiju pamatā ir Bridžmena un modificētās augsta spiediena Bridžmena metodes, kas ļauj iegūt pieņemamas kvalitātes kristālus. Taču šīs metodes ir tālu no ideālām un ir daudz vājāk attīstītas, salīdzinot ar silīcija un gallija arsenīda kristālu audzēšanas tehnoloģijām. Lai iegūtu detektoru kvalitātes kristālus, kompensē kadmija vakances un termiski atdedzina kristālus. Šobrīd, aizvien plašāk tiek pētīta CdZnTe kristālu lāzer atdedzināšana [6]. Tomēr, eksperimenti ar CO₂ lāzer atdedzināšanu noved pie kristālu virsmas bojājumiem, neskatoties uz to, ka īpašības kristāla tilpumā uzlabojas.

Mūsdienās CdZnTe radiācijas detektorus plaši izmanto dažādās sfērās: x-starojuma un γ -starojuma spektroskopijā [37–39], medicīnā [40,41], sabiedriskās drošības [42], x-starojuma un γ -starojuma attēlveidošanā [40,43,44] un astronomijā [41,45].

Mērķis

Šī promocijas darba mērķis ir izpētīt nanosekunžu impulsa lāzera starojuma ietekmi uz CdZnTe kristālu fizikālajām īpašībām.

Novitāte

1. Tika izstrādāta lāzermetode CdZnTe kristālu radiācijas izturības palielināšanai ar nanosekunžu impulsa Nd:YAG lāzeru, izveidojot radiācijas izturīgu virsmas slāni.
2. Tika izstrādāta CdTe/CdZnTe heterostruktūras veidošanas lāzermetode ar nanosekunžu impulsa Nd:YAG lāzeru.
3. Tika izstrādāta lāzermetode CdZnTe γ -starojuma detektoru parametru uzlabošanai ar nanosekunžu impulsa Nd:YAG lāzeru.

Praktiskā nozīme

Šī pētījuma nozīmīguma pamatā ir nepieciešamība labot komerciāli pieejamo CdZnTe kristālu nepilnības. Tika pierādīts, ka nanosekunžu Nd:YAG lāzera starojumu var izmantot CdZnTe kristālu radiācijas izturības palielināšanai un detektoru spektroskopiskās jutības uzlabošanai. Kā arī ar izstrādāto lāzermetodi ir iespējams izveidot CdTe/CdZnTe heteropāreju, kas samazina tumsas strāvu. Izstrādāto lāzermetodi ir iespējams pielietot gan kristālu apstrādei, gan gatavu radiācijas detektoru apstrādei.

2. LITERATŪRAS PĀRSKATS

CdTe un CdZnTe ir II-IV grupas pusvadītāji ar aizliegtās zonas platumu 1.4 – 2.2 eV. CdZnTe aizliegtās zonas platums ir atkarīgs no Zn koncentrācijas. CdTe un CdZnTe ir kubiskā cinka spīdes kristāliskā režģa struktūra F43m. Katrā apakšrežģī atrodas Cd, Zn vai Te atomi, kas veido tetraedrus. Katra atoma četri valences elektroni veido saites ar blakusesošajiem atomiem.

$Cd_{1-x}Zn_xTe$ sastāv no CdTe un ZnTe maisījuma, kurā Zn aizvieto Cd atomus, kuru daudzums ir atkarīgs no x. Pie tam CdTe un ZnTe režģa konstantes ir attiecīgi 6.482 Å un 6.104 Å [7]. Režģa konstantes atšķirība starp CdTe un ZnTe rada elementāršūnas izmēru izmaiņas.

Turklāt, Cd aizvietošana ar Zn ne tikai samazina režģa konstanti, bet arī paplašina aizliegto zonu [10]. Kā tika minēts iepriekš, platāka aizliegtā zona ir vēlams parametrs radiācijas detektoru izgatavošanai. Turklāt, ZnTe saites enerģija ir lielāka nekā CdTe, līdz ar to kristāla mehāniskā izturība arī palielinās. Rezultātā arī samazinās dislokāciju blīvums. Kā arī, Zn piejaukumi palielina Te šķīdību kristālā, tādējādi ierobežojot Te ieslēgumu augšanu [11].

Viena no CdTe un CdZnTe fundamentālajām īpašībām ir kovalentā saite ar daļējām jonu saites īpašībām. Tas ir raksturīgi II-VI grupas, bet ne IV grupas pusvadītājiem, kuriem ir tikai kovalentā saite. Šī novirze no kovalentās saites īpašībām ir iemesls pašdefektu un to kompleksu rašanās iemesls. Galvenā problēma šo defektu izpētē ir tas, ka nav tiešo mērījumu metožu.

Mūsdienās detektoru kvalitātes CdZnTe kristālus audzē ar kustīgās zonas kausēšanas metodi [12]–[15], augsta spiediena Bridžmena metodi [13] un klasisko Bridžmena metodi (CB) [13].

Pusvadītāja optiskās īpašības ir atkarīgas no aizliegtās zonas platumā. CdTe un CdZnTe ir tiešās pārejas pusvadītāji. CdTe optiskās absorbcijas robeža ir ~850 nm, bet CdZnTe tā ir ~800 nm (atkarībā no Zn koncentrācijas). CdTe optiskās caurlaidības diapazonu nosaka aizliegtās zonas platums tuvajā infrasarkanajā diapazonā un kristāliskā režģa svārstības ~30000 nm [17]. Diapazonā starp šiem lielumiem CdTe optiskā caurlaidība ir aptuveni 63%.

Pieci faktori, kas nosaka optiskos zudumus infrasarkanajā gaismas diapazonā [17]:

1. elektronu pārejas starp līmeņiem aizliegtajā zonā;
2. kristāliskā režģa svārstības;

3. gaismas absorbcijas ar elektroniem piesaistītiem pie defektiem, lokalizētiem optiskajiem stāvokļiem, iekšējo elektronu čaulu pārejas;
4. absorbcija uz brīvajiem lādiņnesējiem;
5. optiskie zudumi gaismai izkliedējoties uz ieslēgumiem un precipitātiem;

Piektais faktors ir dominējošais, tomēr to var neņemt vērā ja paraugi tika atdedzināti Cd un Te atmosfērā, jo tādā gadījumā Te ieslēgumu un precipitātu koncentrācija ir zema.

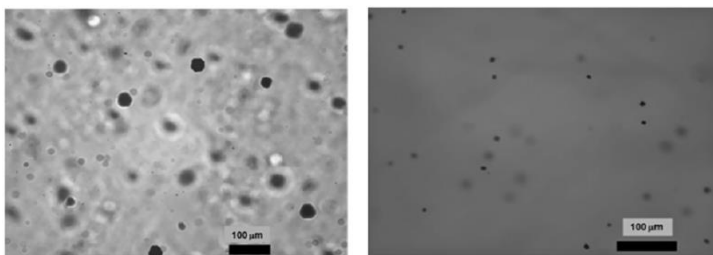
Gaismas absorbcija uz brīvajiem lādiņnesējiem notiek fotonu mijiedarbības ar elektroniem un caurumiem rezultātā. Tāpēc, gaismas absorbcija tuvajā infrasarkanajā diapazonā var tikt izmantota brīvo lādiņnesēju koncentrācijas izmaiņas raksturošanai.

Vēl viens svarīgs parametrs, ko izmanto lāzerapstrādes tehnoloģijās, ir optiskās absorbcijas dziļums, δ , kas ir apgriezti proporcionāls optiskās absorbcijas koeficientam, α .

Eksistē vairāki defektu tipi: vakances, starpmezglu atomi un piemaisījumi.

1. Punktveida defektus var sadalīt divās galvenajās grupās”
2. Pašdefekti (vakances, starpmezglu atomi un aizvietošanas defekti).

Te ieslēgumiem ir negatīva ietekme uz CdZnTe radiācijas detektoru darbību. Vidējais Te precipitātu izmērs ir robežās no 10 – 30 nm, turpretim, Te ieslēgumu izmēri ir 10 – 100 μm [19], [20], skat Att. 2.1.



Att. 2.1. Te ieslēgumu infrasarkanās mikroskopijas attēls [20].

Piemaisījumi parasti koncentrējas pie Te ieslēgumiem un segregējas izaudzētā stieņa galos [2]. Tiek uzskatīts, ka nevienmērīgs Te

ieslēgumu sadalījums kristāla tilpumā, ietekmē lādiņnesēju pārnese un līdz ar to arī no šāda kristāla izgatavotā radiācijas detektora spektroskopiskās īpašības [2].

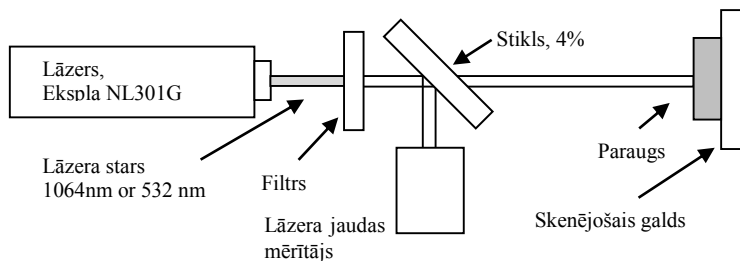
x-Starojuma un γ -starojuma detektoru kristāliem jāpiemīt lielai elektriskai pretestībai un mazai lādiņnesēju ķērāj centru koncentrācijai, kas izraisa nepilnīgu lādiņa savākšanu un spektroskopisko līniju paplašināšanos [8]. Visbiežāk, augstas pretestības CdZnTe kristālus iegūst, attīrot vai leģējot kristālus. Līdz ar to leģējošo piemaisījumu ievadīšana ir svarīgs uzdevums pusvadītāju radiācijas detektoru jomā.

Kad γ -fotons iet cauri detektoram, tas rada elektronu-caurumu pārus. Pie detektora pieliktais elektriskais lauks virza elektronus uz pozitīvi lādētu elektrodu, bet caurumus uz negatīvi lādētu elektrodu. Uz elektrodiem radušos lādiņš tiek uztvertas ar lādiņa pastiprinātāju un tālāk apstrādāts.

3. EKSPERIMENTĀLĀS METODES

CdZnTe kristāli tika iegūti no diviem avotiem: no prof. Ernesto Dieguez “Crystal growth laboratory”, Universidad Autónoma de Madrid, Spānija un Sia “Ritec”, Latvija. Izaudzētie kristāli saturēja lielu Te ieslēgumu koncentrāciju.

Pēc pulēšanas CdZnTe kristāli tika ķīmiski kodināti bromā/metanola šķīdumā [22]–[30]. Tālāk kristālus apstaroja ar Nd:YAG lāzeru, skatīt Att. 3.1.



Att. 3.1. Shematisks lāzerapstrādes sistēmas attēls.

CdZnTe kristālu fizikālo īpašību izmaiņas pēc apstarošanas ar lāzeru, tika raksturotas ar trīs galvenajām izpētes metodēm: Furjē transformāciju infrasarkanā spektroskopija (FTIR), voltampēra raksturliķņu mērīšana un foto luminiscences spektroskopija (FL).

Voltampēra raksturliķnes tika uzņemtas ar Keithley 6487 pikoampērmētru.

FTIR spektri tika uzņemti ar Bruker Vertex 70 spektrometru diapazonā no 1 μm līdz 18 μm . Rezultātā tika novērtēta brīvo lādiņnesēju koncentrācijas izmaiņa, kas ir saistīta ar elektriski aktīvu defektu klātbūtni.

FL spektroskopijas mērījumi tika veikti pirms un pēc apstarošanas ar lāzeru 5 K temperatūrā ar HeNe ierosmes lāzeru ($\lambda=632.8$ nm, jauda 200 mW).

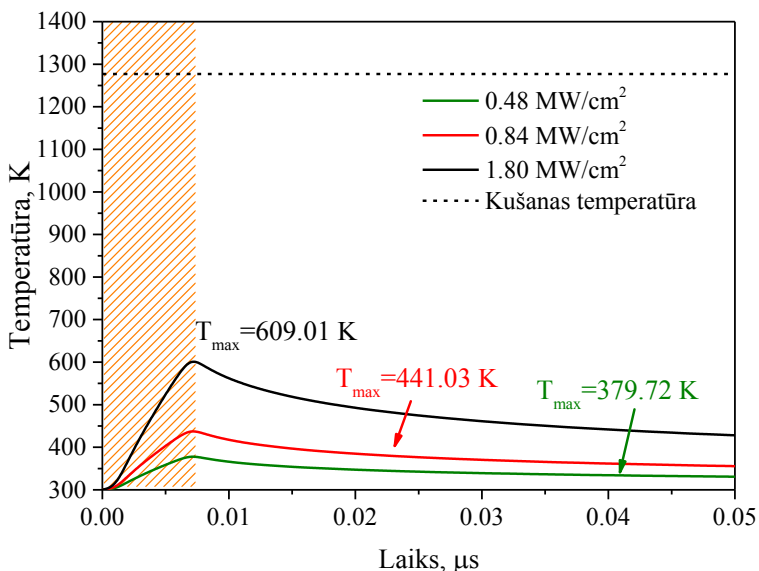
CdZnTe kristālu γ -radiācijas izturību testēja ar ^{60}Co avotu ($E_\gamma = 1.2$ MeV) istabas temperatūrā ar dozu $5 \cdot 10^5$ Rad = 5.0 kGy, pirms un pēc apstarošanas ar lāzeru.

CdZnTe detektoru γ -radiācijas spektrālās jutības mērījumi tika veikti pirms un pēc apstarošanas ar lāzeru. Kā γ -starojuma avotu izmantoja ^{241}Am .

4. REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS

4.1. Radiācijas izturība

^{60}Co γ -starojums izraisa pašdefektu veidošanos CdZnTe kristālos [31]. Tomēr, ja CdZnTe kristālus pirms pakļaušanas γ -radiācijai, apstaro ar lāzeru, palielinās to radiācijas izturība. Šis efekts tiks izskaidrots šajā nodaļā un tiks izvirzīts radiācijas izturības palielināšanas modelis. Lāzera starojums neizraisa CdZnTe kristāla kušanu, skatīt Att. 4.1.



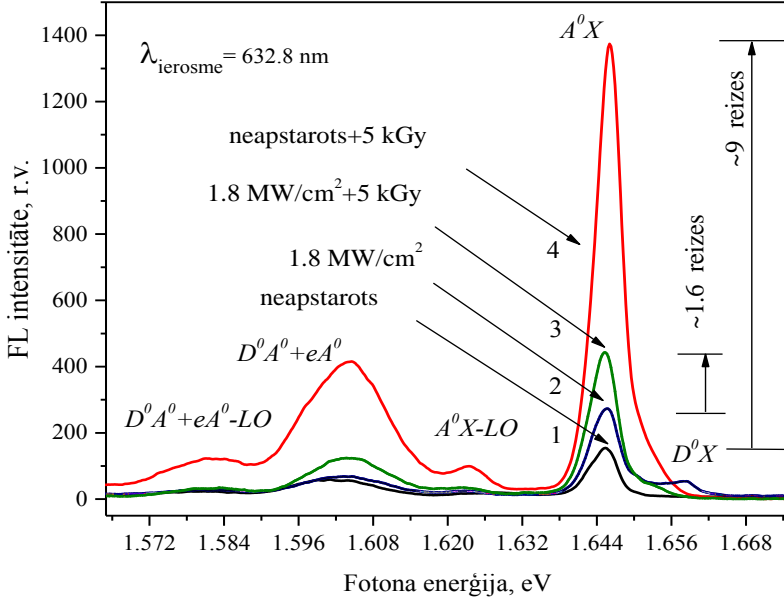
Att. 4.1. Aprēķinātā CdZnTe kristālu virsmas temperatūras atkarība laikā pie dažādām lāzera intensitātēm. Iesvītrotais laukums parāda lāzera impulsa laiku.

Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te kristāla apstarošana ar lāzeru izraisa D⁰X joslas parādīšanos un A⁰X joslas pieaugumu. D⁰X joslas parādīšanās liecina par Cd starpmezglu atomu ģenerāciju. Savukārt A⁰X josla atbilst Cd vakancēm.

Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te kristāla apstarošana ar γ -starojumu ar dozu 5×10^5 Rad = 5.0 kGy, FL spektrā izraisa A⁰X joslas intensitātes pieaugumu, kā tas ir redzams Att. 4.2. A⁰X joslas intensitāte pieaug ~ 9 reizes salīdzinot ar sākotnējo stāvokli. Vienlaicīgi, D⁰X josla pilnība izzūd, skatīt Att. 4.2.

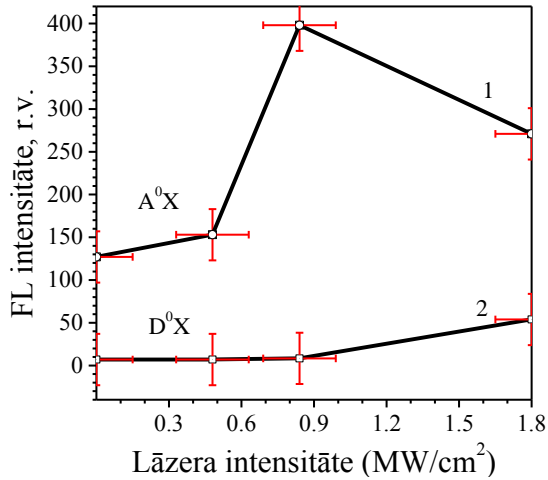
Mēs šo efektu skaidrojam ar Cd vakanču veidošanos un lokalizēšanos pie apstarotās kristāla virsmas.

γ -Starojums izraisa papildus Cd vakanču veidošanos, kas savukārt izraisa A^0X joslas pieaugumu FL spektrā. γ -Starojuma izveidotās vakances aizpildās ar lāzera starojuma izveidotajiem un pie virsmas sakoncentrētajiem Cd starpmezglu atomiem.

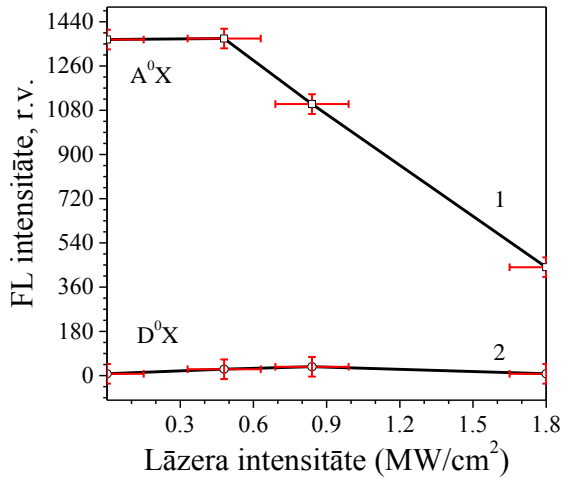


Att. 4.2. $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ kristālu FL spektri pirms un pēc apstarošanas ar dažādām lāzera starojuma intensitātēm, un γ -starojumu: pirms 1 un pēc apstarošanas ar Nd:YAG lāzeru: 2 – apstarots ar Nd:YAG lāzeru ar intensitāti 1.8 MW/cm^2 ; 3 – apstarots ar Nd:YAG lāzeru ar intensitāti 1.8 MW/cm^2 un pakļauts γ -starojumam ar dozu 5.0 kGy ; 4 – pakļauts γ -starojumam ar dozu 5.0 kGy .

Att. 4.3 un Att. 4.4 ir parādīts A^0X un D^0X joslu intensitāšu atkarība no lāzera starojuma intensitātes. Ir redzams, ka izmaiņas FL spektrā sākas tikai pēc lāzera intensitātes 0.84 MW/cm^2 . Savukārt, radiācijas izturība palielināšanas efekts ir visizteiktākais pie lāzera intensitātes 1.8 MW/cm^2



Att. 4.3. A⁰X (1) un D⁰X (2) joslu intensitātes CdZnTe kristālu FL spektros, attiecībā pret Nd:YAG lāzera intensitāti.



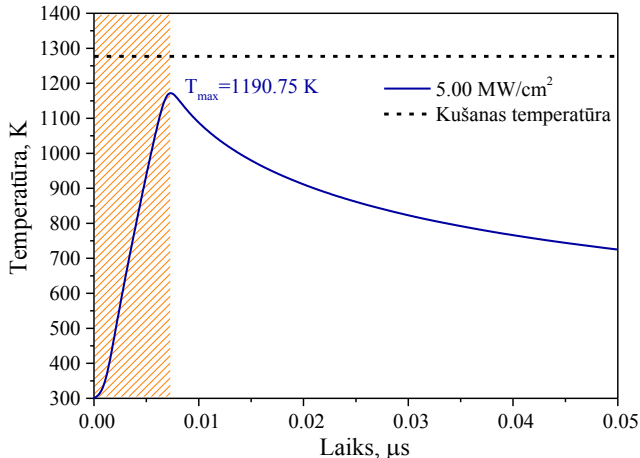
Att. 4.4 A⁰X (1) un D⁰X (2) joslu intensitātes CdZnTe kristālu FL spektros, attiecībā pret Nd:YAG lāzera intensitāti pēc pakļaušanas 5.0 kGy γ -starojuma dozi.

Apstarojot CdZnTe kristālu ar lāzera starojumu, samazinās Cd vakancu daudzums pēc apstarošanas ar γ -starojumu. Tas notiek tāpēc, ka Cd vakances rekombinē ar Cd atomiem, kas ar lāzeru tika izveidoti un koncentrēti pie virsmas. Šo radiācijas izturības palielināšanās procesu var raksturot ar mazāku A^0X joslas pieaugumu pēc apstarošanas ar γ -starojumu.

Jāpiebilst, ka šis defektu novēršanas mehānisms darbojas tikai virs noteiktas lāzera robežintensitātes 0.48 MW/cm^2 un zem ablācijas robežsliekšņa $\sim 12 \text{ MW/cm}^2$.

4.2. CdTe/CdZnTe heterostruktūras veidošana

CdTe un CdZnTe ir daudzsoļi materiāli x un γ -starojuma detektoru ražošanai. Tomēr, lādiņnesēju mobilitāte-dzīves laika koeficients $\mu_h\tau_h \sim 10^{-5} - 10^{-4} \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}$ caurumiem un $\mu_e\tau_e \sim 10^{-4} - 10^{-3} \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}$ elektroniem ir zems, salīdzinot ar Si un GaAs. Atšķirība starp mobilitāte-dzīves laika koeficientu elektroniem un caurumiem un lādiņnesēju ķērāj centriem pasliktina detektora spektroskopiskās īpašības. Šo problēmu var atrisināt palielinot pie kontaktiem pielikto spriegumu, taču tas arī palielina tumsas strāvu un līdz ar to samazina signāls-troksnis attiecību. Kā alternatīvu risinājumu, vairākas zinātniskās grupas piedāvāja izmantot Šotki diodes [32] vai heterostruktūras [33]–[35]. Tas ļauj darbināt CdZnTe detektorus pie lielākiem spriegumiem.

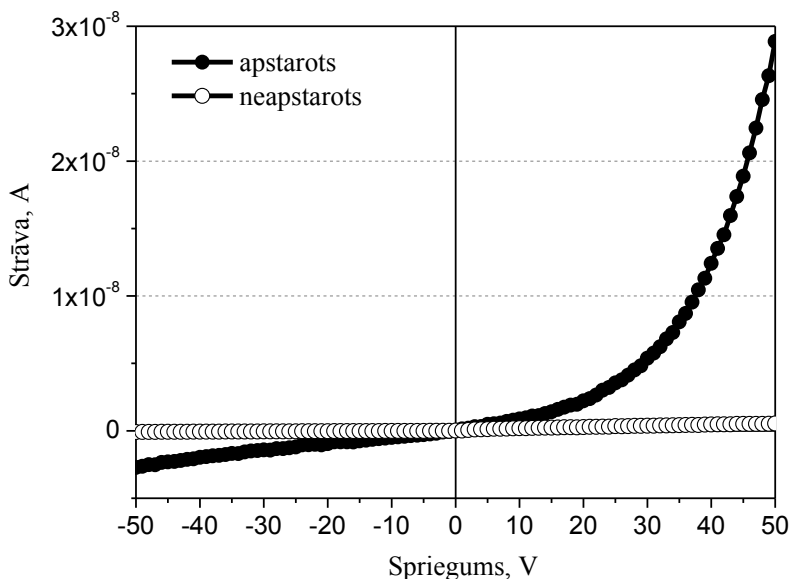


Att. 4.5. Aprēķinātā CdZnTe kristālu virsmas temperatūras atkarība laikā pie dažādām lāzera intensitātēm. Iesvītrotais laukums parāda lāzera impulsa laiku.

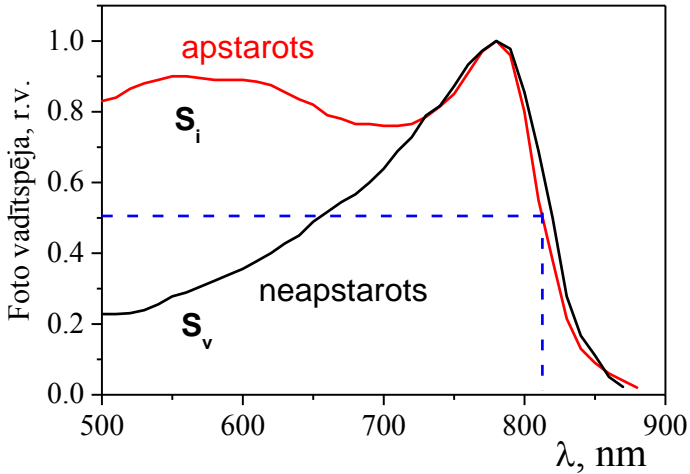
Lāzer inducētās virsmas modifikācijas process tika pētīts $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ kristālos pēc apstarošanas ar nanosekunžu Nd:YAG lāzeru ar intensitāti 5 MW/cm^2 . Pēc apstarošanas ar lāzeru tika novērota virsmas slāņa vadītspējas inversija. Elektriskie kontakti tika izgatavoti ar bezelektrolīzes zelta nogulsnešanas metodi. No spektrālās fotovadītspējas mērījumiem var secināt, ka uz virsmas ir izveidojusies struktūra ar mainīgu aizliegtās zonas platumu.

CdTe/CdZnTe barjerstuktūras veidošanos var izskaidrot ar temperatūras gradienta efektu. Att. 4.6. parādītas CdTe/CdZnTe heterostruktūras voltampēra raksturlīknes

Līdz ar to, var secināt, ka apstarotā p- $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ virsmas slānī veidojas n-tipa vadāmības slānis. Vadītspējas tipa inversija notiek virsmas slānī mazākā nekā pāris mikrometri. Spektrālās fotovadītspējas rezultāti skaidri norāda uz to, ka ir izveidojusies struktūra ar plašāku aizliegtās zonas platumu nekā $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$, skatīt Att. 4.7. Izveidotajai barjerstuktūrai piemīt diodiskas voltampēr raksturlīkņu īpašības, kā redzams Att. 4.6.



Att. 4.6. CdTe/CdZnTe heterostruktūras voltampēra raksturlīknes.



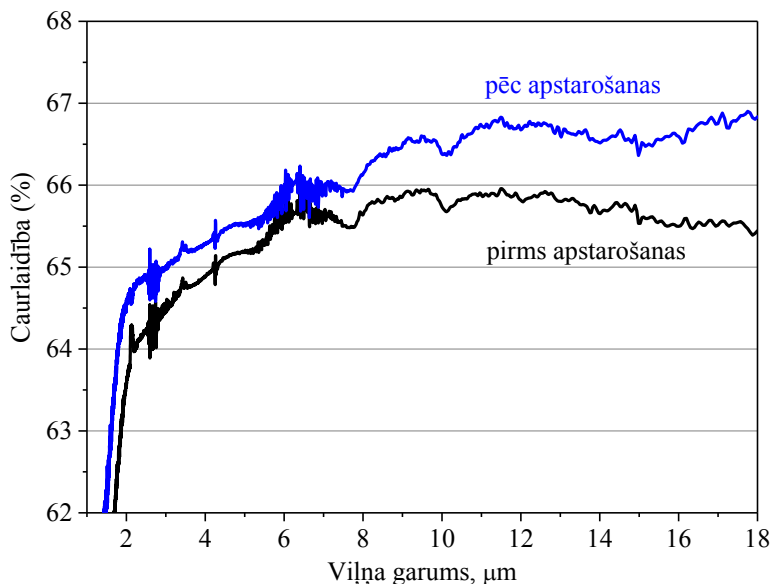
Att. 4.7 Spektrālās fotovadītspējas mērījumi pirms un pēc apstarošanas ar lāzeru. Mērījumi tika veikti sprostvirzienā $T = 295$ K temperatūrā.

Spektrālās fotovadītspējas mērījumi liecina par to, ka heterostruktūras dziļums ir mazāks par elektronu un caurumu difūzijas garumu, par ko liecina fotovadītspējas signāls gan no pamatvielas $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$, gan no CdZnTe ar Zn koncentrāciju lielāku par pamatvielu. Jāpiebilst, ka fotovadītspējas īsviļņu robeža $\lambda_c \cong 810$ nm atbilst gaismas absorbcijas dziļumam ~ 1 μm , jo gaismas absorbcijas koeficients šajā diapazonā ir $\sim 10^3$ cm^{-1} .

4.3. CdZnTe radiācijas detektora parametru uzlabošana

Tika parādīts, ka $\lambda=1064$ nm nanosekunžu Nd:YAG lāzera starojums ar intensitāti 5.0 MW/cm^2 samazina tumsas strāvu CdZnTe radiācijas detektoros. Taču pēc 10^5 impulsiem, tumsas strāvas samazināšanos nenovēro. Voltamēra raksturlīkņu mērījumi parādīja, to ka apstaroto CdZnTe kristālu īpatnējā pretestība dubultojās. Šo efektu ir iespējams izskaidrot divos veidos: pirmais ir brīvo lādiņnesēju kustīguma samazināšanās, bet otrs ir brīvo lādiņnesēju koncentrācijas samazināšanās. Ar optiskās caurlaidības mērījumiem ir iespējams raksturot brīvo lādiņnesēju koncentrācijas samazināšanos [36]. Īpatnējās pretestības

izmaiņas tika salīdzinātas ar gaismas caurlaidības spektriem no FTIR mērījumiem apstarotiem un neapstarotiem CdZnTe paraugiem, Att. 4.8. No literatūras ir zināms, ka gaismas absorbcijas diapazonā no 8-20 μm galvenokārt saistīta ar absorbciju uz brīvajiem lādiņnesējiem. Savukārt, brīvo lādiņnesēju koncentrāciju ir saistīta ar nekompensētajiem elektriski aktīvajiem defektiem un kadmija vakancēm [36]–[39].

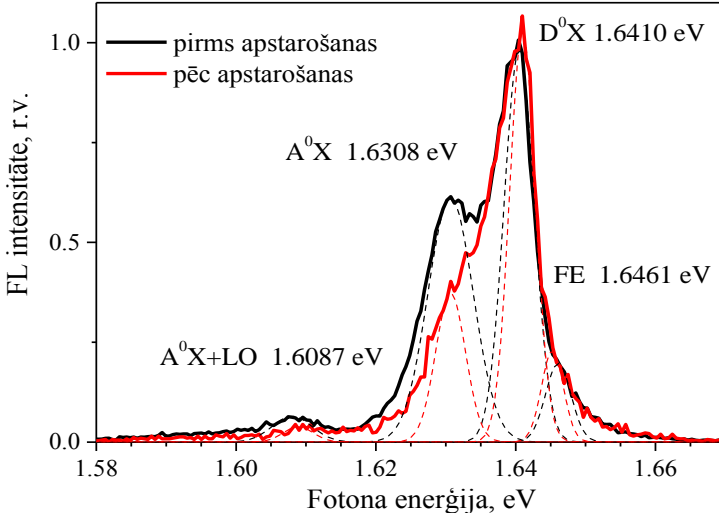


Att. 4.8. CdZnTe paraugu FTIR spektri pirms un pēc apstarošanas ar $\lambda=1064$ nm nanosekunžu Nd:YAG lāzera starojums ar intensitāti 5.0 MW/cm^2

Tipisks FL spektrs satur A^0X joslu pie 1.6308 eV, kas ir saistīta saistīto eksitonu pie seklā akceptora (V_{Cd}) vai piemaisījumiem (Cu, Fe, u.c.), D^0X joslu pie 1.6410 eV, kas ir saistīta ar saistīto eksitonu pie seklā donora (Cd) un indija atomu kadmija vietā (In_{Cd}) [5]. Vēl FL spektri satur A^0X fononu atkārtojumus pie 1.6087 eV. Ar indiju leģētajos CdZnTe kristālos D^0X ir dominējošā josla, turpretim, neleģētā CdZnTe dominējošā josla ir A^0X [5], [40].

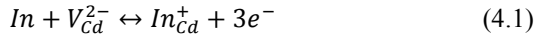
Brīvo eksitonu (FE) pīķa klātbūtne FL spektrā pie 1.6461 eV un donoru akceptoru pāru joslas neesamība liecina par CdZnTe kristāla

kvalitāti [5]. Pēc apstarošanas ar lāzeru D^0X joslas intensitāte palielinās, bet A^0X joslas intensitāte samazinās, skatīt Att. 4.9.

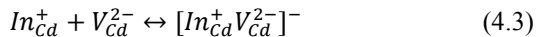


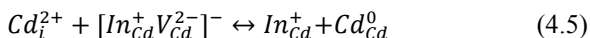
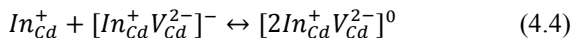
Att. 4.9. CdZnTe paraugu FL spektri pirms un pēc apstarošanas ar lāzeru (3.6×10^4 impulsi).

Izmaiņas apstarota CdZnTe FL spektrā var izskaidrot sekojoši. Ir zināms, ka daļa indija un kadmija atomu CdZnTe kristālos atrodas starpmezglu telpā [5], [41]. Pēc apstarošanas ar lāzeru kadmija vakances aizpildās ar indija vai kadmija starpmezglu atomiem, saskaņā ar formulām:



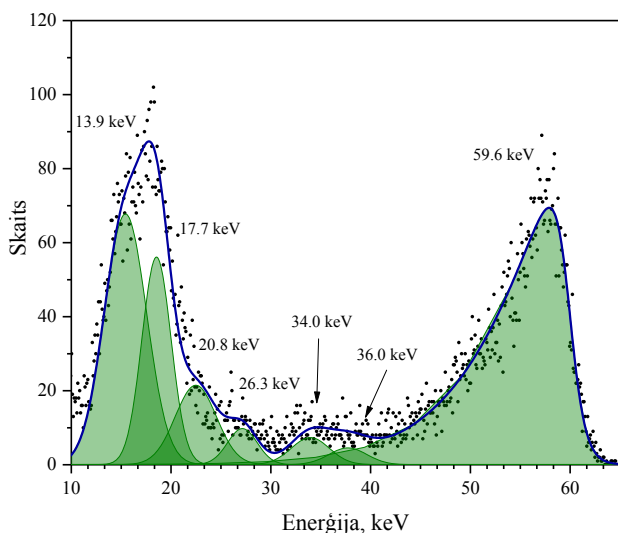
Saskaņā ar iepriekš minētājām formulām, defektu rekombinācijas rezultātā rodas neitrāls Cd_{Cd}^0 . Līdz ar to, donoru koncentrācija palielinās, bet akceptoru (V_{Cd}) koncentrācijas samazinās. Rezultātā, A^0X joslas intensitāte FL spektrā samazinās. Kā arī ir zināms, ka indijs var aizvietot kadmija vakanci veidojot vienreiz lādētu $[In_{Cd}^+V_{Cd}^{2-}]^-$ un neitrālu $[2In_{Cd}^+V_{Cd}^{2-}]^0$ kompleksu, saskaņā ar vienādojumiem [42], [43]:



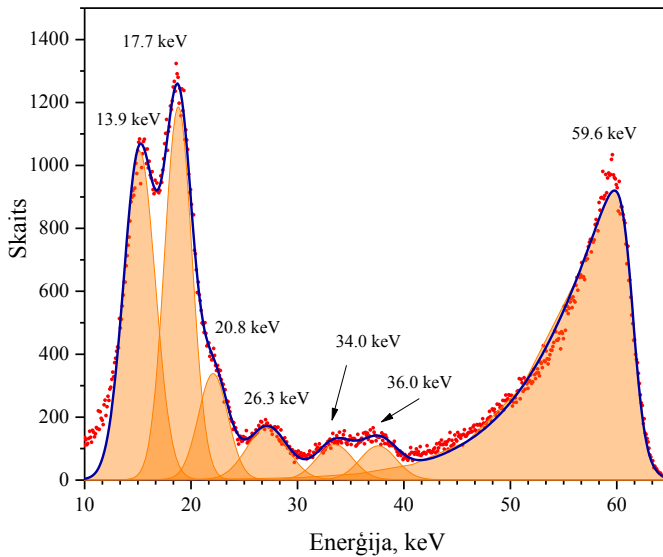


Paškompensācijas process samazina In_{Cd}^+ donoru un $[\text{In}_{\text{Cd}}^+ \text{V}_{\text{Cd}}^{2-}]^-$ akceptoru koncentrāciju, kas saskaņā ar eksperimentālajiem rezultātiem parāda, ka D^0X joslas intensitāte praktiski nemainās.

CdZnTe detektoru γ -starojuma spektrālo izšķiršanas spēju var raksturot ar FWHM (Full Width at Half Maximum- pilnais platums pus augstumā), skatīt Att. 4.10 un Att. 4.11 Līdz ar to, ^{241}Am γ -starojuma spektri, kas tika uzņemti ar lāzeru apstarotiem un neapstarotiem CdZnTe detektoriem, tika sadalīti Gausa līknes un FWHM tika aprēķināts no iegūtajiem pīķiem. Pēc CdZnTe detektoru kristālu apstarošanas ar lāzera starojumu FWHM vērtības ^{241}Am raksturīgajiem pīķiem samazinājās par 30%, skatīt Tabula 4.1



Att. 4.10. Neapstarota CdZnTe detektoru ^{241}Am γ -spektra sadalīšanas rezultāts.



Att. 4.11. Apstarota CdZnTe detektoru ^{241}Am γ -spektra sadalīšanas rezultāts.

Tabula 4.1 ^{241}Am γ -spektra pīķu pozīcijas un FWHM vērtības ar lāzeru apstarotiem un neapstarotiem CdZnTe radiācijas detektoriem.

Pīķa pozīcija, keV	FWHM pirms lāzer apstarošanas, keV	FWHM pēc lāzer apstarošanas, keV	FWHM izmaiņa pēc lāzer apstarošanas, %
13.9	5.0 ± 0.13	3.5 ± 0.08	-30.0
17.7	3.4 ± 0.14	3.0 ± 0.14	-11.7
20.8	4.7 ± 0.64	3.2 ± 0.51	-31.9
26.3	3.9 ± 0.79	4.1 ± 0.70	5.1
34.0	4.5 ± 1.39	4.0 ± 1.10	-11.1
36.0	4.5 ± 1.96	4.0 ± 1.00	-11.1
59.6	8.6 ± 0.13	7.7 ± 0.06	-30.0

5. SECINĀJUMI

1. CdZnTe radiācijas izturība.

Tika pierādīta $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ kristālu radiācijas izturības palielināšanās pēc kristālu apstarošanas ar $\lambda=532$ nm nanosekunžu impulsa lāzeru ar intensitātēm 0.84 – 1.8 MW/cm². Radiācijas izturības palielināšanos skaidro ar Cd_i bagātināta slāņa veidošanos pie apstarotās $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ kristāla virsmas. Ar Cd_i bagātināts slānis veidojas lāzera starojuma izraisītā temperatūras gradienta ietekmē ~123 nm dziļumā.

2. CdTe/CdZnTe heterostrukturās veidošana.

CdTe/CdZnTe heterostrukturā veidojas pēc $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ kristālu apstarošanas ar $\lambda=532$ nm nanosekunžu impulsa lāzeru ar intensitāti 5 MW/cm². Temperatūras gradienta ietekmē, 10^8 - 10^9 K/m, Zn atomi dreifē no augsttemperatūras zonas uz zemākas temperatūras apgabalu, savukārt Cd_i dreifē apstarotās kristāla virsmas virzienā.

3. CdZnTe radiācijas detektora parametru uzlabošana

Tika pierādīta $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ kristālu radiācijas detektoru parametru uzlabošana (signāls-troksnis attiecība, lādiņa savākšanas efektivitāte, spektrālā izšķiršanas spēja) pēc apstarošanas ar $\lambda=1064$ nm nanosekunžu impulsa lāzeru ar intensitāti 5 MW/cm². Te ieslēgumi absorbē lāzera starojumu un uzkarst nanosekunžu laikā veidojot temperatūras gradientu ~ 10^8 K/m. Temperatūras gradienta ietekmē nevēlamie piemaisījumi precipitējas apkārt Te ieslēgumiem un indija atomi rekombinē ar kadmija vakancēm.

6. AIZSTĀVAMĀS TĒZES

1. CdZnTe radiācijas izturība pieaug 7.4 reizes pēc tā apstarošanas ar 532 nm nanosekunžu Nd:YAG lāzera starojumu ar intensitāti 0.84 – 1.8 MW/cm². Radiācijas izturība palielinās kadmija starpmezglu atomu dreifa dēļ uz kristāla virsmu un kadmija vakanču dreifa kristāla tilpumā.
2. CdTe/CdZnTe heterostruktūra veidojas 532 nm nanosekunžu Nd:YAG lāzera starojuma ar intensitāti 5 MW/cm² ietekmē. Kadmija starpmezglu atomi dreifē apstarotās kristāla virsmas virzienā, bet cinka atomi dreifē tilpumā.
3. Atdedzinot CdZnTe kristālus ar Te ieslēgumiem ar 1064 nm nanosekunžu Nd:YAG lāzera starojumu ar intensitāti 5 MW/cm² par 5% palielinās CdZnTe radiācijas detektora lādiņa savākšanas efektivitāte un spektrālā izšķiršanas spēja uzlabojas par ~30%.

7. PUBLIKĀCIJAS

Monogrāfija

1. "Nd:YAG Laser", book edited by Dan C. Dumitras, chapter "Application of Nd:YAG Laser in Semiconductors' Nanotechnology", Artur Medvid', Aleksandr Mycko, Pavels Onufrijevs and Edvins Dauksta, Publisher: InTech

Patents

2. LV 14439 B Pusvadītāju radiācijas izturības uzlabošanas paņēmieni, Aleksandrs Mičko, Artūrs Medvids, Edvīns Daukšta

Publikācijas

3. Mychko A., Medvid A., Dauksta E., Laser-induced increase of resistivity and improvement of optical properties of CdZnTe crystal, Journal of Crystal Growth, Volume 415, 2015, Pages 47-50 (**Scopus**) (**Web of Science**)
4. Medvid, A., Onufrijevs, P., Dauksta, E. & Sobolev, N.A., Homo- and hetero structures formation in semiconductors by laser radiation: First stage of quantum cones formation, Solid State Phenomena, Volume 205-206, 2014, Pages 475-479 (**Scopus**)
5. Shankar, H., Castaldini, A., Dieguez, E., Dauksta, E., Medvid, A., Rubio, S., & Cavallini, A. (2014). Investigation of Deep Level Defects in CdTe Thin Films. In Cavallini, A and Estreicher, SK (Ed.), INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEFECTS IN SEMICONDUCTORS 2013 (Vol. 1583, pp. 145-149) (**Scopus**) (**Web of Science**)
6. Medvid', A., Mychko, A., Dauksta, E., Ivanov, V., Alekseeva, L., Dieguzs, E., Crosso, J., Bensalah, H., Improvement of CdZnTe radiation detectors parameters by laser radiation, (2011) IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, art. no. 6154756, pp. 4672-4673 (**Scopus**) (**Web of Science**)
7. Medvid, A., Mychko, A., Dauksta, E., Naseka, Y., Crocco, J., Dieguez, E., The effect of laser radiation on CdZnTe radiation hardness, (2011) Journal of Instrumentation, 6 (11), art. no. C11010 (**Scopus**) (**Web of Science**)
8. Medvid, A., Mychko, A., Dauksta, E., Dieguez, E., Naseka, Y., CdZnTe radiation hardness increasing by laser radiation, (2010) 3rd International Conference - Radiation Interaction with Material

and Its Use in Technologies 2010, Program and Materials, Interaction'2010, pp. 329-330 (**Scopus**) (**Web of Science**)

9. Medvid, A., Mychko, A., Dauksta, E., Naseka, Y., Crocco, J., Dieguez, E., Increased radiation hardness of CdZnTe by laser radiation, (2010) IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, art. no. 5873918, pp. 1014-1016 (**Scopus**) (**Web of Science**)

8. KONFERENCES

1. Edvins Dauksta, Arturs Medvids, Aleksandrs Mychko, The improvement of CdZnTe:In radiation detector parameters by laser, European materials research society Fall meeting 2014, Warsaw, Poland, September 15-18, 2014 (**Best student presentation award**)
2. Medvid, P. Onufrijevs, R. Janeliukstis, E. Dauksta, J.Plaza, S.Rubio, E. Diéguez, I. Dmitruk and N. Berezvska, „Thermogradient Mechanism of Defect Precipitation in Semiconductor Crystals”, ABSTRACTS of 15th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors, Vilnius, Lithuania, August 25-28, 2013.
3. Aleksandrs Mičko, Artūrs Medvids, Edvīns Daukšta, Ernesto Diéguez, Hakima Bensalah, „IMPROVEMENT OF CdZnTe CRYSTAL QUALITY BY LASER RADIATION”, Abstracts of the Riga Technical University 53rd International Scientific Conference: Section: Material Science and Applied Chemistry October 11-12 2012 Riga, Latvia p. 30, 2012.
4. Daukšta, E., Medvids, A., Mičko, A., Dieguez, E. Laser Processing of CdZnTe, its Optical and Electrical Properties. Abstracts of the Riga Technical University 53rd International Scientific Conference: Section: Material Science and Applied Chemistry October 11-12 2012 Riga, Latvia.
5. Medvid', P. Onufrijevs and A. Mychko, Influence of Laser Radiation on Electrical Properties of CdZnTe Crystal , Book of Abstract of the conference 'Functional materials and nanotechnologies - FM&NT-2011' p.79, 2011.
6. Medvid', A., Mychko, A., Dauksta, E., Ivanov, V., Alekseeva, L., Dieguzs, E., ... Bensalah, H. (2011). Improvement of CdZnTe radiation detectors parameters by laser radiation. In 2011 IEEE

Nuclear Science Symposium Conference Record (pp. 4672–4673).
IEEE. doi:10.1109/NSSMIC.2011.6154756

7. Medvids, A., Mvchko, A., Barloti, J., Dauksta, E., Naseka, Yu., Mechanism of nanostructure formation on a surface of CdZnTe crystal by laser irradiation, (2010) 3rd International Conference - Radiation Interaction with Material and Its Use in Technologies 2010, Program and Materials, Interaction'2010, p. 141.
8. Medvid, Artur; Mychko, Aleksandr; Dauksta, Edvins, CdZnTe RADIATION HARDNESS INCREASING BY LASER RADIATION, (2010) 3rd International Conference - Radiation Interaction with Material and Its Use in Technologies 2010, Program and Materials, Interaction'2010, p. 141.
9. Medvid, A., Mychko, A., Dauksta, E., Naseka, Y., Crocco, J., & Dieguez, E. (2010). Increased radiation hardness of CdZnTe by laser radiation. In IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference (pp. 1014–1016). IEEE. doi:10.1109/NSSMIC.2010.5873918.

9. CITAS PUBLĀCIJAS

1. Grigonis, A., Naujokaitis, R., Mychko, A., Dauksta, E., & Zabels, R. (2010). Infrared and visible light pulsed laser irradiation of DLC films. In *3rd International Conference - Radiation Interaction with Material and Its Use in Technologies 2010, Program and Materials, Interaction'2010* (pp. 337–340).
2. Kalnina, D., Gross, K. A., Onufrijevs, P., Dauksta, E., Nikolajeva, V., Stankeviciute, Z., & Kareiva, A. (2015). The antimicrobial action of silver halides in calcium phosphate. In *Key Engineering Materials* (Vol. 631, pp. 384–389).
3. Kropman, D., Mellikov, E., Kärner, T., Laas, T., Medvid, A., Onufrijevs, P., & Dauksta, E. (2011). Stress Relaxation Mechanism by Strain in the Si-SiO₂ System and its Influence on the Interface Properties. *Solid State Phenomena*, 178-179, 259–262.
4. Kropman, D., Mellikov, E., Karner, T., Medvid, A., Onufrijevs, P., & Dauksta, E. (2011). Stress relaxation mechanism by strain in the Si-SiO₂ system and its influence on the interface properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 25(1), 012018.
5. Medvid, A., Onufrievs, P., Dauksta, E., Blumbeka, L., Barloti, J., Ulyashin, A., ... Pundyk, I. (2010). Formation of P-N junction in ITO/P-Si structure by Nd: Yag laser radiation for solar cells application. In *3rd International Conference - Radiation Interaction with Material and Its Use in Technologies 2010, Program and Materials, Interaction'2010* (pp. 208–211).
6. Medvid, A., Onufrijevs, P., Dauksta, E., Barloti, J., Grabovskis, D., & Ulyashin, A. (2009). Dynamics of nanostructure formation using point

- defects on semiconductors by laser radiation. *Physica Status Solidi (c)*, 6(8), 1927–1928.
7. Medvid, A., Onufrijevs, P., Dauksta, E., & Kyslyi, V. (2010). Formation of “black silicon” by laser radiation for solar cells application. In *3rd International Conference - Radiation Interaction with Material and Its Use in Technologies 2010, Program and Materials, Interaction'2010* (pp. 89–90).
 8. Medvid, A., Onufrijevs, P., Fedorenko, L., Rimshans, J., & Dauksta, E. (2008). Properties of porous Si fabricated by laser radiation and subsequent electrochemical etching. In *International Conference - Radiation Interaction with Material and its use in Technologies 2008* (pp. 60–61).
 9. Medvid, A., Onufrijevs, P., Fedorenko, L., Yusupov, N., & Dauksta, E. (2009). Suppression of Pores Formation on a Surface of p-Si by Laser Radiation. *Solid State Phenomena*, 156-158, 337–341.
 10. Medvid, A., Onufrijevs, P., Jarimaviciute-Gudaitiene, R., Dauksta, E., & Prosycevas, I. (2013). Formation mechanisms of nano and microcones by laser radiation on surfaces of Si, Ge, and SiGe crystals. *Nanoscale Research Letters*, 8(1), 264.
 11. Medvid, A., Onufrijevs, P., Mozolevskis, G., Dauksta, E., & Rimša, R. (2012). Two-stage model of nanocone formation on a surface of elementary semiconductors by laser radiation. *Nanoscale Research Letters*, 7(1), 428.
 12. Medvid, A., Onufrijevs, P., & Dauksta, E. (2013). Two-stage model of quantum cones formation on a surface of semiconductors by laser radiation. In *2013 13th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO 2013)* (pp. 1054–1057).
 13. Medvid, A., Onufrijevs, P., Dauksta, E., Barloti, J., Ulyashin, A. G., Dmytruk, I., & Pundyk, I. (2011). P-N Junction Formation in ITO/p-Si Structure by Powerful Laser Radiation for Solar Cells Applications. *Advanced Materials Research*, 222, 225–228.
 14. Medvid, A., Onufrijevs, P., Dauksta, E., & Kyslyi, V. (2011). “Black Silicon” Formation by Nd:YAG Laser Radiation. *Advanced Materials Research*, 222, 44–47.
 15. Medvids, A., Mvchko, A., Barloti, J., Dauksta, E., & Naseka, Y. (2010). Mechanism of nanostructure formation on a surface of CdZnTe crystal by laser irradiation. In *3rd International Conference - Radiation Interaction with Material and Its Use in Technologies 2010, Program and Materials, Interaction'2010* (p. 141).
 16. Onufrijevs, P., Medvid, A., Dauksta, E., & Trautnitz, T. (2011). Decrease of Point Defect Concentration at a Surface of ZnO/Si Heterostructure by Powerful Laser Radiation. *Advanced Materials Research*, 222, 158–161.
 17. Puritis, T., Kaupuzs, J., & Dauksta, E. (2011). Mechanisms of Strong Photoluminescence from Si Nanocrystals. *Advanced Materials Research*, 222, 175–180.
 18. Šutka, A., Timusk, M., Kisand, V., Šutka, A., & Dauksta, E. (2015). Fabrication of Lead Titanate PbTiO₃ Nanofiber Mats Via Electrospinning. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 12, E117–E121.

10. LITERATŪRAS AVOTI

- [1] R. Arlt, K. H. Czock, and D. Rundquist, "Overview of the use of CdTe detectors for the verification of nuclear material in nuclear safeguards," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 322, no. 3, pp. 575–582, 1992.
- [2] R. Arlt and D. Rundquist, "Room temperature semiconductor detectors for safeguards measurements," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 380, no. 1–2, pp. 455–461, 1996.
- [3] M. Aparo and R. Alt, "Development and safeguards use of advanced CdTe and CdZnTe detectors," in *NUCLEAR MATERIALS MANAGEMENT-ANNUAL MEETING-*, 1998, vol. 27, pp. 1846–1858.
- [4] B. Fraboni, A. Cavallini, and W. Dusi, "Damage induced by ionizing radiation on CdZnTe and CdTe detectors," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, vol. 51, no. 3 III, pp. 1209–1215.
- [5] Q. Li, W. Jie, L. Fu, G. Yang, G. Zha, T. Wang, and D. Zeng, "Photoluminescence analysis on the indium doped Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te crystal," *J. Appl. Phys.*, vol. 100, no. 1, p. 013518, 2006.
- [6] M. Meier and M. Harrison, "Laser-induced thermomigration of Te precipitates in CdZnTe crystals," *J. Cryst. Growth*, vol. 311, no. 17, pp. 4247–4250, 2009.
- [7] N. Romcevic, M. Romcevic, R. Kostic, D. Stojanovic, B. Abolmasov, G. Karczewski, and R. Galazka, "Resonant Raman spectra of CdTe/ZnTe self assembled quantum dots," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 116, no. 1, pp. 88–90, 2009.
- [8] T. Schlesinger, J. Toney, H. Yoon, E. . Lee, B. . Brunett, L. Franks, and R. . James, "Cadmium zinc telluride and its use as a nuclear radiation detector material," *Mater. Sci.*, vol. 32, no. 4–5, pp. 103–189, 2001.
- [9] S. Stolyarova, F. Edelman, a Chack, a Berner, P. Werner, N. Zakharov, M. Vytrykhivsky, R. Beserman, R. Weil, and Y. Nemirovsky, "Structure of CdZnTe films on glass," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 6, p. 065402, 2008.
- [10] M. C. M. Chu, S. Terterian, and D. Ting, "Role of zinc in CdZnTe radiation detectors: why zinc? How much?," *2003 IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec. (IEEE Cat. No.03CH37515)*, vol. 5, pp. 3338–3341, 2003.

- [11] C. Szeles, "CdZnTe and CdTe materials for X-ray and gamma ray radiation detector applications," *Phys. Status Solidi Basic Res.*, vol. 241, no. 3, pp. 783–790, 2004.
- [12] L. Verger, M. Boitel, M. C. Gentet, R. Hamelin, C. Mestais, F. Mongellaz, J. Rustique, and G. Sanchez, "Characterization of CdTe and CdZnTe detectors for gamma-ray imaging applications," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 458, no. 1–2, pp. 297–309, 2001.
- [13] Eurorad, "<http://www.eurorad.com/materials.php>," 2015. [Online]. Available: <http://www.eurorad.com/materials.php>.
- [14] Acrorad, "<http://www.acrorad.co.jp/us/material.html>," 2015. [Online]. Available: <http://www.acrorad.co.jp/us/material.html>.
- [15] P. Capper, *Properties of Narrow Gap Cadmium-based Compounds*. INSPEC, the Institution of Electrical Engineers, 1994.
- [16] A. Peyghambarian, N. Koch, S. W. & Mysyrowicz, *Introduction to semiconductor optics*. Prentice Hall College Div, 1993.
- [17] R. O. Bell, "Review of optical applications of CdTe," *Rev. Phys. Appliquée*, vol. 12, no. 2, pp. 391–399, Feb. 1977.
- [18] C. Honsberg and S. Bowden, "<http://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/absorption-coefficient>," 2015. [Online]. Available: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/absorption-coefficient>.
- [19] M. Fiederle, A. Fauler, and A. Zwerger, "Crystal growth and characterization of detector grade (Cd,Zn)Te crystals," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, vol. 54, no. 4, pp. 769–772.
- [20] H. Bensalah, J. Crocco, V. Carcelén, A. Black, Q. Zheng, J. L. Plaza, and E. Diéguez, "Effect of superheating and fast cooling on Te inclusions of Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te:In crystals grown by vertical gradient freezing," *J. Cryst. Growth*, vol. 361, no. 1, pp. 5–10, 2012.
- [21] P. K. L. H.R. Vydyanath, J. Ellsworth, J.J. Kennedy, B. Dean, C.J. Johnson, G.T. Neugebauer, J. Sepich, "Recipe to minimize Te precipitation in CdTe and (Cd,Zn)Te crystals," *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.*, vol. 10, no. 4, p. 1476, 1992.
- [22] S. H. Cho, J. H. Suh, J. H. Won, K. H. Kim, J. K. Hong, and S. U. Kim, "Surface leakage current control with heterojunction-type passivation in semi-insulating CdZnTe material," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 591, no. 1, pp. 203–205, 2008.
- [23] S. Awadalla, *Solid-State Radiation Detectors: Technology and Applications*. CRC Press, 2015.

- [24] L. V. . b Poperenko, D. V. . Gnatyuk, V. A. . Odarych, I. V. . b Yurgelevich, S. N. . Levytskyi, and T. . Aoki, “Laser-induced modification of the surface state and optical properties of CdTe crystals,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 222, pp. 28–31, 2011.
- [25] J. Chu and A. Sher, *Device Physics of Narrow Gap Semiconductors*. Springer Verlag, 2009.
- [26] S. Cho, J. Suh, J. Won, K. Kim, J. Hong, and S. Kim, “Surface leakage current control with heterojunction-type passivation in semi-insulating CdZnTe material,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 591, no. 1, pp. 203–205, Jun. 2008.
- [27] T.-J. Yang and T.-B. Wu, “Effect of Etching on Composition and Morphology of CdTe(111) Surfaces,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 34, pp. 6184–6194, 1995.
- [28] S. Del Sordo, L. Abbene, E. Caroli, A. M. A. M. Mancini, A. Zappettini, and P. Ubertini, “Progress in the development of CdTe and CdZnTe semiconductor radiation detectors for astrophysical and medical applications,” *Sensors*, vol. 9, no. 5, pp. 3491–3526, May 2009.
- [29] J. Chu and A. Sher, *Physics and properties of narrow gap semiconductors*. Springer Verlag, 2008.
- [30] I. M. Kotina, L. M. Tukhkonen, G. V Patsekina, a V Shchukarev, and G. M. Gusinskii, “Study of CdTe etching process in alcoholic solutions of bromine,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 13, pp. 890–894, 1999.
- [31] A. Cavallini, B. Fraboni, W. Dusi, M. Zanarini, M. Hage-Ali, and P. Siffert, “Defects introduced in cadmium telluride by γ irradiation,” *J. Appl. Phys.*, vol. 89, no. 8, pp. 4664–4666, 2001.
- [32] T. Takahashi, B. Paul, K. Hirose, C. Matsumoto, R. Ohno, T. Ozaki, K. Mori, and Y. Tomita, “High-resolution Schottky CdTe diode for hard X-ray and gamma-ray astronomy,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 436, no. 1–2, pp. 111–119, 1999.
- [33] Y. Chang, C. H. Grein, C. R. Becker, X. J. Wang, Q. Duan, S. Ghosh, P. Dreiske, R. Bommena, J. Zhao, M. Carmody, F. Aqariden, and S. Sivananthan, “CdZnTe radiation detectors with HgTe/HgCdTe superlattice contacts for leakage current reduction,” in *Journal of Electronic Materials*, 2011, vol. 40, no. 8, pp. 1854–1859.
- [34] M. Niraula, K. Yasuda, S. Namba, T. Kondo, S. Muramatsu, Y. Wajima, H. Yamashita, and Y. Agata, “MOVPE Growth of Thick Single Crystal CdZnTe Epitaxial Layers on Si Substrates for Nuclear

- Radiation Detector Development,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 60, no. 4, pp. 2859–2863, 2013.
- [35] “MOVPE Growth of Thick Single Crystal CdZnTe Epitaxial Layers on Si Substrate for Nuclear Radiation Detector Development,” *Nucl. Sci. Symp. Med. Imaging Conf. (NSS/MIC), 2012 IEEE*, no. R07–1, pp. 4212–4215, Oct. 2012.
- [36] L. Yujie, G. Zhi, L. Guoqiang, and J. Wangqi, “Infrared transmission spectra of Cd_{1-x}Zn_xTe (x = 0.04) crystals,” *J. Electron. Mater.*, vol. 33, no. 8, pp. 861–866, Aug. 2004.
- [37] G. A. Kulkarni, K. S. R. Koteswara Rao, R. Raman, A. Pandey, R. K. Sharma, A. K. Garg, and M. Srivastava, “Quality assessment of CdZnTe (Zn ~ 4 %) crystals,” in *2007 International Workshop on Physics of Semiconductor Devices, 2007*, pp. 453–455.
- [38] J. Zhu, X. Zhang, B. Li, and J. Chu, “The effects of Te precipitation on IR transmittance and crystalline quality of as-grown CdZnTe crystals,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 40, no. 5, pp. 411–415, Oct. 1999.
- [39] S. Sen, D. R. Rhiger, C. R. Curtis, M. H. Kalisher, H. L. Hettich, and M. C. Currie, “Infrared absorption behavior in CdZnTe substrates,” *J. Electron. Mater.*, vol. 30, no. 6, pp. 611–618, Jun. 2001.
- [40] A. Medvid’, Y. Hatanaka, D. Korbutjak, L. Fedorenko, S. Krilyuk, and V. Snitka, “Generation of the A-centres at the surface of CdTe(Cl) by YAG:Nd laser radiation,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 197–198, pp. 124–129, Sep. 2002.
- [41] G. Yang, W. Jie, and Q. Zhang, “Photoluminescence investigation of CdZnTe:In single crystals annealed in CdZn vapors,” *J. Mater. Res.*, vol. 21, no. 07, pp. 1807–1809, Mar. 2011.
- [42] P. Yu and W. Jie, “Photoluminescence analysis of high-resistivity CdZnTe:In single crystals obtained by annealing,” *J. Lumin.*, vol. 146, pp. 382–386, Feb. 2014.
- [43] P. Fochuk, O. Korovyanko, I. Turkevych, O. Panchuk, and P. Siffert, “Defect chemistry in CdTe ⟨In⟩ crystals,” *J. Cryst. Growth*, vol. 207, no. 4, pp. 273–277, Dec. 1999.