

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Transporta un mašīnzinību fakultāte
Biomedicīnas inženierzinātņu un nanotehnoloģiju institūts

Marina ROMANOVA

Doktora studiju programmas „Inženiertehnika, mehānika, mašīnbūve” (RMDM8)
virziena „Medicīniskā inženierzinātne un medicīnas fizika” doktorante

**UZ $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ NANOSTRUKTURĒTO KĀRTIŅU ELEKTRONU
EMISIJU BALSTĪTA JONIZĒJOŠĀ STAROJUMA DOZIMETRIJAS
METODE**

Promocijas darba kopsavilkums

Nozare: Mašīnzinātne
Apakšnozare: Mēraparāti un metroloģija

Zinātniskais vadītājs
Dr.habil.phys., profesors
J. DEHTJARS

Rīga 2015

UDK 614.876(043.2)
Ro 413 u

Romanova M. Uz $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu elektronu emisiju balstīta jonizējošā starojuma dozimetrijas metode. Promocijas darba kopsavilkums.- R.:RTU, 2015.-36 lpp.

Iespiests saskaņā ar BINI institūta 2015.gada 22.janvāra lēmumu, protokols Nr.3



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektos «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai», vienošanās Nr. 2009/0144/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/005, un «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai – 2», vienošanās Nr. 2011/0053/1DP/1.1.2.1.2/11/IPIA/VIAA/003.

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 30. jūnijā, plkst. 13:00, Rīgas Tehniskās universitātes promocijas padomē „RTU P-16”, Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6a, 405. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.phys. Jānis Kalnačs
Fizikālās enerģētikas institūts, Latvija

Vadošais pētnieks, Dr.habil.phys. Donāts Millers
Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūts, Latvija

Profesore, Dr. phys. Diana Adliene
Kauņas Tehnoloģiskā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

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

Marina Romanova(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 3 nodaļas, secinājumus, rekomendācijas, izmantotās literatūras sarakstu, kopā 75 lappuses. Literatūras sarakstā ir 74 nosaukumi.

SATURA RĀDĪTĀJS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
Tēmas aktualitāte	5
Darba mērķis un uzdevumi	5
Pētījuma metodes	6
Aizstāvamās tēzes	6
Zinātniskā novitāte	6
Praktiskā nozīmība	6
Darba aprobācija	7
Publikācijas	8
1. LITERATŪRAS APSKATS.....	10
1.1. Nanodozimetrija	10
1.2. Detektori nanodozimetrijā.....	10
2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA.....	12
2.1. Priekšnosacījumi nanodozimetra izveidošanai.....	12
2.1.1. Nanodozimetra fizikālais pamatojums.....	12
2.1.2. Dozas nolasīšana.....	13
2.2. Paraugi un pētījumu metodes	13
2.2.1. $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētas kārtiņas nanodozimetrijai.....	13
2.2.2. $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu raksturošana	15
2.2.3. Fotoelektronu emisija kā dozas nolasīšanas metode.....	15
2.2.4. Starojumi dozas piegādei	16
2.2.5. $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu atkvēlināšana.....	17
3. REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS.....	17
3.1. Nanodaļiņu izmantošanas nanodozimetrijā teorētiskais pamatojums.....	17
3.2. Nanodozimetra praktiskā realizācija	19
3.3. Fotoelektronu emisijas spektru vispārīga apstrāde.....	20
3.4. PbS nanodaļiņu ietekme uz $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētu kārtiņu fotoelektronu emisiju	21
3.5. Starojumu ietekme uz $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu fotoelektronu emisiju.....	25
3.5.1. Nejonizējošā UV starojuma ietekme uz $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu fotoelektronu emisiju	25
3.5.2. Jonizējošā elektronu starojuma ietekme uz $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu fotoelektronu emisiju.....	26
3.5.3. Elektronu starojuma absorbētās dozas mērīšanas kļūda	27
3.6. $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu atjaunošana pēc apstarošanas ar elektronu starojumu	28
3.6.1. Atkvēlināšanas temperatūras izvēle.....	28
3.6.2. Fotoemisijas spektru izmaiņa laikā pēc atkvēlināšanas	29
3.6.3. $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu apstarošana ar elektronu starojumu pēc atkvēlināšanas	30
SECINĀJUMI	32
REKOMENDĀCIJAS.....	32
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	33
PATEICĪBAS	36

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Ļaundabīgie audzēji ir otrais galvenais nāves cēlonis ES dalībvalstīs pēc asinsrites sistēmas slimībām, turklāt Latvijā, Lietuvā un Igaunijā šie mirstības radītāji ir vieni no lielākajiem Eiropā [36]. 2014. gadā Latvijā ļaundabīgie audzēji bija nāves cēlonis 21% gadījumos [47]. Viena no pamata vēža ārstēšanas metodēm ir staru terapija [6]. Latvijā vismaz 20% no visiem onkoloģijas pacientiem saņem staru terapiju kā vienīgu ārstēšanas veidu vai kombinācijā ar citiem ārstēšanas veidiem [46].

Staru terapijas laikā ļaundabīgs audzējs tiek apstarots ar jonizējošo starojumu. Starojums sarauj saites vēža šūnu DNS (dezoksiribonukleīnskābe) molekulā, rezultātā šūnas vairs nespēj dalīties un iet bojā [22]. Tomēr tādā pašā veida starojums iedarbojas uz veselo audu šūnu DNS molekulām, līdz ar to ir svarīgi palielināt starojuma piegādes precizitāti vēža audiem lai samazinātu starojuma dozu, ko absorbē veselie audi. Lai to nodrošinātu, ir svarīgi kontrolēt gan laukumu, kurā starojums tiek piegādāts, gan starojuma absorbēto dozu, kuras mērīšanai izmanto dozimetrus.

Nemot vērā starojuma iedarbību uz DNS molekulu, kuras diametrs ir 2 nm, ir svarīgi zināt, kādu starojuma dozu absorbē nanoizmēra bioloģiskais objekts. Pašlaik neeksistē dozimetri, kas spēj mērīt absorbēto dozu nanoobjektos, līdzīgos pēc izmēra DNS molekulas diametram, tāpēc absorbēto dozu modelē, piemēram, ar Monte Karlo metodēm [39, 53]. Lai būtu iespējams izmērīt nanoobjektā absorbēto starojuma dozu, un tādā veidā pārbaudīt un precizēt modelēšanas rezultātus, ir nepieciešams izstrādāt nanodozimetru un tā izmantošanas metodi.

Promocijas darbā tika izstrādāta jonizējošā starojuma dozimetrijas metode, kas ļauj reģistrēt nanoizmēra objektos absorbēto dozu. Tika pētītas pusvadītāja svina sulfīda (PbS) nanodaļiņas, kas ir ieslēgtas dielektriskā cirkonija oksīda (ZrO_2) nanokārtiņā ($ZrO_2:PbS$ nanostrukturēta kārtiņa). Absorbētās dozas nolasīšanai tika izmantota fotoelektronu emisijas (FE) spektroskopija [26]. Promocijas darbā arī parādīts, ka ir iespējams izdzēst $ZrO_2:PbS$ nanostrukturētās kārtiņās uzkrāto jonizējošā starojuma absorbēto dozu, veicot kārtiņu atkvēlināšanu.

Darba mērķis un uzdevumi

Izstrādāt jonizējošā starojuma dozimetrijas metodi, kas ļauj mērīt nanoizmēra objektos absorbēto dozu.

Mērķa sasniegšanai ir izvirzīti sekojošie uzdevumi:

- 1) Izstrādāt teorētisko pamatojumu nanodozimeta izveidei.
- 2) Piedāvāt nanodozimeta praktisko realizāciju, kuru izmantot turpmākajos eksperimentos.
- 3) Izstrādāt nanodozimetrā signāla nolasīšanas metodi.
- 4) Izveidot tarēšanas līkni nanodozimeta signāla atkarībai no starojuma absorbētās dozas un, izmantojot izveidoto tarēšanas līkni, novērtēt dozas mērīšanas kļūdu.
- 5) Izstrādāt nanodozimeta dozimetrisko īpašību atjaunošanas metodi pēc apstarošanas.
- 6) Izstrādāt rekomendācijas piedāvāta nanodozimeta izmantošanai nanodozimetrījā.

Pētījuma metodes

ZrO₂:PbS nanostrukturētas kārtiņas tika pasūtītas un izgatavotas ar sola-gēla metodi Ebreju Jeruzalemes Universitātē (Izraēla), Neorganiskās ķīmijas institūtā, prof. Renatas Reisfeldas vadībā (*Hebrew University of Jerusalem, Institute of Inorganic Chemistry, Prof. Renata Reisfeld*). ZrO₂:PbS kārtiņu biezuma un PbS nanodaļiņu diametru noteikšanai tika izmantota skenējošā elektronu mikroskopija (FE-SEM Hitachi S4800 [24]) un kodināšana ar Ar⁺ joniem (Gatan Inc. Precision Etching Coating System, Model 682 [20]). FE reģistrācijai tika izmantota sliekšņa fotoemisijas spektroskopija. Lai piegādātu starojuma dozu, ZrO₂:PbS nanostrukturētas kārtiņas tika apstarotas ar ultravioleto (UV) starojumu (HAMAMATSU Lightningcure LC5 L8222 avots ar 200 W gāzizlādes lampu L8251 [30, 51]) un jonizējošo elektronu starojumu (lineārais paātrinātājs VARIAN CLINAC 2100CD [11]).

Aizstāvamās tēzes

- 1) *Ar PbS nanodaļiņām saistīta FE signāla izdalīšanas metode no ZrO₂:PbS nanostrukturētas kārtiņas FE spektra.* ZrO₂:PbS kārtiņas FE strāvas pieaugums, kas aprēķināts FE ierosinošo fotonu enerģijas diapazonā no 4,9 līdz 5,5 eV, ir saistīts ar PbS nanodaļiņu klātbūtni ZrO₂ kārtiņā. Pieaugot PbS molu daļai ZrO₂ kārtiņā, FE strāvas pieaugums palielinās.
- 2) *Uz ZrO₂:PbS nanostrukturētas kārtiņas (nanodozimetrs) FE balstīta jonizējošā starojuma dozimetrijas metode.* Starojuma absorbētā doza ietekmē FE strāvas pieaugumu, kas rēķināts enerģijas diapazonā no 4,9 līdz 5,5 eV. Lai noteiktu ZrO₂:PbS kārtiņas nanodozimetrā absorbēto dozu, FE strāvas pieauguma izmaiņa pēc apstarošanas jāsālīdzina ar nanodozimetra tarēšanas līkni.
- 3) *No ZrO₂:PbS nanostrukturētas kārtiņas veidota nanodozimetra dozimetrisko īpašību atjaunošanas metode pēc apstarošanas.* Nanodozimetro iespējams izmantot atkārtoti, to atkvēlinot vakuumā, 150 °C temperatūrā, un atkārtoti nanodozimetrs ir izmantojams ne ātrāk kā pēc 4 diennaktīm pēc atkvēlināšanas.

Zinātniskā novitāte

Pirmo reizi:

- 1) Uz ZrO₂:PbS nanostrukturētas kārtiņas piemēra tika demonstrēta nanodozimetra izveides iespējamība ar nanodaļiņām kā starojuma jutīgajiem elementiem un FE kā dozas nolasīšanas metodi.
- 2) Tika izdalīts ar PbS nanodaļiņām saistīts FE signāls no ZrO₂:PbS nanostrukturētas kārtiņas FE spektriem.
- 3) Tika izstrādāta dozimetrijas metode, kas ļauj mērīt ZrO₂:PbS nanostrukturētā kārtiņā absorbēto jonizējošā starojuma dozu (parādīts uz 9 MeV elektronu starojuma piemēra dozu diapazonā 0–10 Gy).
- 4) Tika izstrādāta un demonstrēta apstarotas ZrO₂:PbS nanostrukturētas kārtiņas atkvēlināšanas metode, kas izdzēs kārtiņā absorbēto jonizējošā starojuma dozu un atjauno kārtiņas dozimetriskās īpašības.

Praktiskā nozīmība

Izstrādātā dozimetrijas metode ir noderīga uz nanostrukturām balstītu nanodozimetro izstrādei. Nanodozimetros būs iespējams pielietot radiobioloģijā, pētot starojuma iedarbību uz

nanoizmēra bioloģiskiem objektiem. Attīstoties zināšanām par starojuma ietekmi uz nanoizmēra bioloģiskiem objektiem, paaugstināsies staru terapijas efektivitāte un drošība.

Darba aprobācija

Par promocijas darba rezultātiem ziņots sekojošās konferencēs:

- 1) 6th International Conference on Medical Physics "Medical Physics in the Baltic States 2008", October 10-11, 2008, Kaunas, Lithuania;
- 2) Riga Technical University 49th International Scientific Conference, October 13-15, 2008, Riga, Latvia;
- 3) The NATO Advanced Study Institute "Technological Innovations in Detection and Sensing of Chemical Biological Radiological Nuclear Threats and Ecological Terrorism", June 7-17, 2010, Chisinau, Moldova;
- 4) Riga Technical University 51th International Scientific Conference, October 11-15, 2010, Riga, Latvia;
- 5) 15th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics (NBC 2011), June 14-16, 2011, Aalborg, Denmark;
- 6) International Conference "Functional Materials and Nanotechnologies" (FM&NT-2011), April 5-8, 2011, Riga, Latvia;
- 7) Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku III kongress un Letonikas IV kongress: sekcija "Tehniskās zinātnes", 24.-27. oktobrī, 2011., Rīga, Latvija;
- 8) Biomedical Engineering 2011, October 27-28, Kaunas, Lithuania;
- 9) International Conference "Functional Materials and Nanotechnologies" (FM&NT-2012), April 17-20, 2012, Riga, Latvia;
- 10) 2nd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering (ICNBME-2013), April 18-20, 2013, Chisinau, Moldova;
- 11) Science, Technology and Innovative Technologies in the Prosperous Epoch of the Powerful State, June 12-14, 2013, Ashgabat, Turkmenistan;
- 12) International Conference on Bionics and Prosthetics, Biomechanics and Mechanics, Mechatronics and Robotics (ICBBM 2013), June 17-21, 2013, Riga, Latvia;
- 13) 10th International Conference on Nanosciences & Nanotechnologies (NN13), July 9-12, 2013, Thessaloniki, Greece;
- 14) 15th International Conference-School "Advanced Materials and Technologies", August 27-31, 2013, Palanga, Lithuania;
- 15) Riga Technical University 54th International Scientific Conference, October 14-16, 2013, Riga, Latvia;
- 16) The 13th International Conference on Global Research and Education "Inter Academia 2014", September 10-12, 2014, Riga, Latvia.

Promocijas darbs turpina 2008. gadā uzsāktos RTU Biomedicīnas inženierzinātņu un nanotehnoloģiju institūta (BINI) pētījumus par $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētu kārtiņu pielietošanu jonizējošā starojuma nanodozimetrijā, kad promocijas darba autore aizstāvēja bakalaura darbu „ PbS ZrO_2 nanokārtiņu fotoelektronu spektroskopija”, bet 2009. gadā – maģistra darbu „Elektronu starojuma ietekme uz $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ plēvīšu fotoemisijas spektriem un virsmas elektrisko potenciālu”.

Pētījumā virzienā promocijas darba autores vadībā tika izstrādāti bakalaura darbi:

- Borzola, Aleksandra. *Pusēnas veidošanās pārklātajā ar masku $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņā, apstarojot to ar ultravioleto starojumu*. Rīga: [RTU], 2012. 51 lpp.

- Beļikovs, Vjačeslavs. *Elektronu un gamma starojuma ietekme uz $ZrO_2:PbS$ filmas virsmas elektrisko potenciālu un pjezoatsauci*. Rīga: [RTU], 2012. 88 lpp.
- Krumpāne, Diāna. *Elektronu un gamma starojuma ietekme uz $ZrO_2:PbS$ filmas fotoemisijas īpašībām*. Rīga: [RTU], 2012. 52 lpp.
- Rešetņikova, Aļisa. *$ZrO_2:PbS$ nano pārklājuma virsmas attīrīšanas un atkvēlināšanas ietekme uz fotoemisiiju*. Rīga: [RTU], 2013. 66 lpp.
- Kovaļovs, Pāvels. *$ZrO_2:PbS$ filmas fotoemisijas izmantošanas iespējamība gamma un elektronu starojuma nanodozimetrijai*. Rīga: [RTU], 2013. 72 lpp.

Publikācijas

Galvenie promocijas darba rezultāti ir nopublicēti:

I. Kolektīvās monogrāfijas nodaļas

- 1) Dekhtyar Yu., Romanova M., Anischenko A., Sudnikovich A., Polyaka N., Reisfeld R., Saraidarov T., Polyakov B. PBS Nanodots for Ultraviolet Radiation Nanosensor. - Vaseashta A., Braman E., Susmann P., eds. *Technological Innovations in Sensing and Detection of Chemical, Biological, Radiological, Nuclear Threats and Ecological Terrorism*. - Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2012. - pp.361-366. ISBN 978-940072487-7 (**SCOPUS**)
- 2) Dekhtyar Yu., Krumpāne D., Perovicha K., Reisfeld R., Romanova M., Saraidarov T., Surkova I. Electron Emission Standed Nanodosimetry and Gas Detection. - Vaseashta A., Khudarverdyan S., eds. *Advanced Sensors for Safety and Security*. - Dordrecht: Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013. - pp.173-180. ISBN 978-94-007-7002-7 (**SCOPUS**)

II. Raksti zinātniskajos žurnālos

- 1) Dekhtyar Yu., Krumpāne D., Perovicha K., Reisfeld R., Romanova M., Saraidarov T., Soudnikovich A., Surkova I. Electron Emission for Nanodosimetry of Ionizing Radiation and Gas Sensing// *Chemical Sensors*. - 2013. - Vol.3. - Article ID6. - pp.1-4.

III. Raksti konferenču rakstu krājumā

- 1) Dekhtyar Yu., Kovalovs P., Krumpāne D., Reisfeld R., Resetnikova A., Romanova M., Saraidarov T., Surkova I. Photoelectron Emission from PbS Nanodots for Dosimetry of Ionizing Radiation// *Proceedings of the 9th Baltic - Bulgarian Conference on bionics and prosthetics, biomechanics and mechanics, mechatronics and robotics: ICBBM 2013, Latvia, Riga, 17-21 June, 2013*. Riga: ICBBM Conference Committee, 2013. - pp.207-210.
- 2) Dekhtyar Yu., Polyaka N., Reisfeld R., Romanova M., Saraidarov T., Soudnikovich A. ZrO_2 Glass Films Influenced by Ultraviolet Radiation// *Medical Physics in the Baltic States 2008: Proceedings of the 6th International Conference on Medical Physics, Lithuania, Kaunas, 10-11 October, 2008*. - pp.27-31.
- 3) Dekhtyar Yu., Romanova M., Anischenko A., Sudnikovich A., Polyaka N., Reisfeld R., Saraidarov T., Polyakov B. PbS Nanodots For Ultraviolet Radiation Dosimetry// *IFMBE Proceedings*. - 2011. - Vol.34. - pp.133-136. (**SCOPUS**)
- 4) Dekhtyar Yu., Romanova M., Stalidzane K., Katashev A., Reisfeld R., Saraidarov T. PbS Nanodots for Electron Radiation Thin-Film Sensor// *Biomedical Engineering 2011: Proceedings of the International Conference, Lithuania, Kaunas, 27-28 October, 2011*. - pp.111-114.
- 5) Krumpāne D., Dekhtyar Yu., Surkova I., Romanova R. Photoelectron Emission as a Tool to Assess Dose of Electron Radiation Received by $ZrO_2:PbS$ films// *2nd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering*

(ICNBME-2013): Proceedings, Moldova, Chisinau, 18-20 April, 2013. Chisinau: Technical University of Moldova, 2013. - pp.649-651.

IV. Konferenču tēzes

- 1) Dehtjars J., Kataševs A., Romanova M., Stalidzāne K., Reisfeld R., Saraidarov T. ZrO₂ plānā kārtiņā ievietoto PbS nanodaļiņu pielietošana jonizējošā starojuma dozimetrijā// Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku III kongress un Letonikas IV kongress: sekcija "Tehniskās zinātnes": tēžu krājums, Latvija, Rīga, 24.-27. oktobris, 2011. - 35. lpp.
- 2) Dekhtyar Yu., Anishchenko A., Polyakov B., Romanova M., Reisfeld R., Saraidarov T., Soudnikovich A. PbS Nanodots for Ultraviolet Radiation Nano Sensor// The NATO Advanced Study Institute, Technological Innovations in Detection and Sensing of Chemical Biological Radiological Nuclear Threats and Ecological Terrorism, Moldova, Chisinau, 7-17 June, 2010. - p.62.
- 3) Dekhtyar Yu., Katashev A., Reisfeld R., Romanova M., Saraidarov T., Stalidzane K. PbS Nanodots in ZrO₂ Thin-Film Matrix as a Possible Material for Microdosimetry of Ionizing Radiation// International Baltic Sea Region Conference "Functional Materials and Nanotechnologies 2012" (FM&NT): Proceedings, Latvia, Riga, 17-20 April, 2012. - p.87.
- 4) Dekhtyar Yu., Kovalovs P., Krumpāne D., Reisfeld R., Resetnikova A., Romanova M., Saraidarov T., Surkova I. Influence of Medical Electron Radiation and Annealing on Photoelectron Emission from Lead Sulphide Nanodots// Book of Abstracts of the 15th International Conference-School "Advanced Materials and Technologies", Lithuania, Palanga, 27-31 August, 2013. Kaunas: Technologija, 2013. - p.78.
- 5) Dekhtyar Yu., Perovicha K., Romanova M. Electron Emission Standed Nanodosimetry and Gas Detection// Advanced Research Workshop "Technological Innovations in CBRNE Sensing and Detection for Safety, Security, and Sustainability", Armenia, Yerevan, 29 Sep-1 Oct., 2012. Armenia: 2012. - p.53.
- 6) Dekhtyar Yu., Romanova M., Anischenko A., Sudnikovich A., Polyaka N., Reisfeld R., Saraidarov T. , Polyakov B. Zirconia Films Doped with PbS Nanodots for Ultraviolet Radiation Dosimetry// International Baltic Sea Region Conference "Functional Materials and Nanotechnologies 2011" (FM&NT): Proceedings, Latvia, Riga, 5-8 April, 2011. - p.104.
- 7) Dekhtyar Yu., Kovaļovs P., Reisfeld R., Rešetņikova A., Romanova M., Saraidarov T., Surkova I. PbS Nanodots for Nanodosimetry of Ionizing Radiation// The 13th International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia 2014: Digest, Latvia, Riga, 10-12 September, 2014. Riga Technical University: 2014. - pp.178-179.
- 8) Krumpāne D., Dekhtyar Yu., Surkova I., Romanova M. Lead Sulfide Nanodots as a Tool for Detection of Dose of Electron Radiation Used in Radiation Therapy// "Science, Technology and Innovative Technologies in the Prosperous Epoch of the Powerful State". Abstracts of papers of the International Scientific Conference, Turkmenistan, Ashgabat, 12-14 June, 2013. Academy of sciences of Turkmenistan: "Ylym" publishing house, 2013. - pp.342-345.
- 9) Romanova M., Krumpāne D., Reisfeld R., Saraidarov T., Surkova I., Dekhtyar Yu. Photoelectron Emission from PbS Nanodots for Dosimetry of Electron Radiation Used in Radiation Therapy// 10th International Conference on Nanosciences & Nanotechnologies (NN13): Abstract Book, Greece, Thessaloniki, 9-12 July, 2013. Thessaloniki: 2013. - p.297.

1. LITERATŪRAS APSKATS

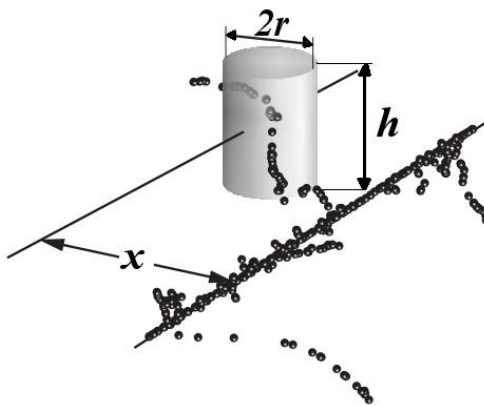
1.1. Nanodozimetrija

Jonizējošā starojuma dozimetrija – ir inženierijas un lietišķās fizikas joma, kuras mērķis ir pētīt fizikālos lielumus, kas raksturo jonizējošā starojuma ietekmi uz dzīvās un nedzīvās dabas objektiem, kā arī metodes un instrumentus šo fizikālo lielumu mērīšanai.

Klasiskā dozimetrija pēta starojuma absorbciju makro izmēra objektos, un tās pamatlielums ir absorbētā doza (D), kas ir masas (m) vienībā absorbētā jonizējošā starojuma enerģija (E), tās SI sistēmas mērvienība ir grejs (Gy) [27, 32]:

$$D = dE/dm \text{ (Gy = J / kg)} \quad (1.1)$$

Bioloģisko šūnu neatgriezeniskie bojājumi galvenokārt ir saistīti ar starojuma veidotām jonizācijām DNS molekulā, kuras diametrs ir 2 nm [22]. Līdz ar to rodas nepieciešamība mērīt starojuma dozas, kas absorbējas bioloģiskos objektos ar izmēriem daži nanometri. Ar to nodarbojas *nanodozimetrija*.



1.1. att. Jonizāciju veidošanās cilindriskajā mērķī ar rādiusu r un augstumu h , jonizējošai daļiņai lidojot attālumā x no cilindra centrālās ass [21]

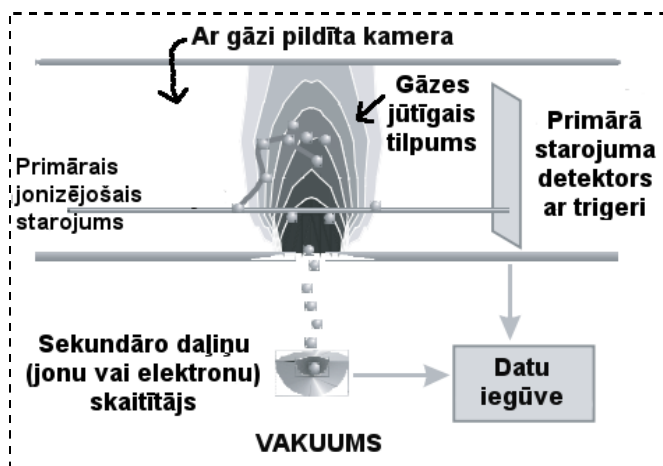
Pašlaik nav iespējams izmērīt nanoobjektā absorbēto starojuma dozu, tāpēc absorbētā doza tiek novērtēta ar modelēšanu. DNS molekulu ir iespējams modelēt kā cilindru ar rādiusu r un augstumu h (1.1. att.) [21]. Jonizējošā daļiņa lido attālumā x no cilindra centrālās ass un jonizē vielu savā ceļā. Absorbētā doza veidojas no jonizācijām cilindrā iekšā, tāpēc fizikālie lielumi nanodozimetrijā ņem vērā jonizējošās daļiņas trajektoriju nanometru attālumos [21].

1.2. Detektori nanodozimetrijā

Komerčiāli pieejamiem vismazākajiem dozimetriem (jonizācijas mikro kameras, silīcija diožu matricas, scintilāciju dozimetri, dimanta dozimetri, dozimetriskās filmas, tranzistori) ir milimetru vai mikrometru izmērs [28, 31, 48, 52], tāpēc tos nav iespējams izmantot nanodozimetrijā.

Viena no pieejām nanotilpumā absorbētās dozas novērtēšanai balstās uz fizikālās modelēšanas veikšanu, izmantojot gāzes dozimetrus [5, 12, 13, 19]. Gāzes dozimetru vienkāršota shēma apskatāma 1.2. att.. Primārais jonizējošais starojums ienāk ar gāzi pildītā kamerā, šķērso bezsienu cilindriskā mērķa tilpumu, kuram ir milimetru izmēri, jonizē gāzi tajā, un sasniedz primārā starojuma detektoru. Primārā starojuma detektors ir sinhronizēts ar jonizāciju skaitītāju, kas atrodas vakuumā un spēj detektēt atsevišķas uzlādētas daļiņas. Kad

primārais starojums sasniedz detektoru, ar trigeri tiek iedarbināta jonizāciju skaitīšana. Sekundārie elektroni vai joni, kas rodas jonizāciju rezultātā, tiek izvilkti ārā no mērķa tilpuma, pieliekot attiecīgas polaritātes elektrisko spriegumu, un tiek saskaitīti [34, 39]. Izmantojot mērķa tilpuma cilindrisku formu, modelē DNS molekulas formu.



1.2. att. Gāzes dozimetra vienkāršota shēma [21]

DNS molekulas blīvums ir lielāks nekā gāzes blīvums, tāpēc, lai aprēķinātu nepieciešamu gāzes spiedienu mērķa tilpumā, izmanto blīvumu mērogošanu [21]. Blīvumu mērogošanas mērķis ir sasaistīt jonizāciju skaitu, kas tiek mērīts milimetru izmēra gāzes mērķa tilpumos, ar jonizāciju skaitu, kas tiek sagaidīts nano izmēra DNS molekulā.

Gāzes dozimetru trūkumi:

- 1) Gāzes dozimetri nenodrošina absorbētās dozas tiešos mērījumus nanotilpumā. Nanotilpumā absorbēto dozu modelē, veicot mērījumus milimetru izmēra tilpumos.
- 2) Gāzes dozimetrus var izmantot tikai reālā laika dozimetrijā, jo jonizācijas gāzē izzūd pēc starojuma izslēgšanas.
- 3) Gāzes dozimetri nav mobili, jo tiek izmantota vakuumsūkņu, vakuumkameras un gāzes piegādes sistēmas.

Otra pieeja ir uz luminiscenci balstītu dozimetru izmantošana.

Avotā [49] ir parādīts *rentgenstaru luminiscences* pielietojums nanodozimetrijā. Ar eiropiju leģētā itrija oksīda ($Y_2O_3:Eu$) nanodaļiņām ar diametru 150 nm tika novērota sarkanas gaismas luminiscence, apstarojot tās ar rentgenstarojumu. Tika novērota lineārā korelācija starp luminiscences maksimālo intensitāti, laukumiem zem luminiscences maksimumiem un rentgenstarojuma maksimālo enerģiju un strāvu. Izmantojot fotokameru, bija iespējams vizualizēt milimetru izmēra apstaroto apgabalu peles silikona fantomā, tomēr dotajā avotā netika demonstrēts, ka iespējams mērīt absorbēto dozu nanotilpumā. Pie tam $Y_2O_3:Eu$ nanodaļiņu diametrs ir 150 nm, kas daudzas reizes pārsniedz DNS molekulas diametru 2 nm.

Avotā [17] aprakstīts *termoluminiscences* potenciālais pielietojums nanodozimetrijā. Termoluminiscences nanodozimetrija balstās uz parādību, ka materiālu sildot, notiek elektronu un caurumu rekombinācija luminiscences centros, kuru izmērs ir vienāds ar DNS diametru. Litija fluorīds ar magnija un titāna piemaisījumu ($LiF:Mg,Ti$, komerciālais nosaukums TLD-100) tika apstarots ar jonizējošo starojumu un pēc apstarošanas tika reģistrēts materiāla spīdēšanas spektrs (angļu valodā *glow curve*) – termoluminiscences intensitāte atkarībā no sildīšanas temperatūras. Spīdēšanas spektrs tika sadalīts uz atsevišķiem luminiscences maksimumiem, un konstatēts, ka viens no maksimumiem veidojas, kad elektrons rekombinējas ar caurumu 2 nm lielā elektronu ķērajcentrā. Izdalot šī maksimuma intensitāti ar galvenā maksimuma intensitāti, konstatēts, ka šīs attiecības lielums pieaug,

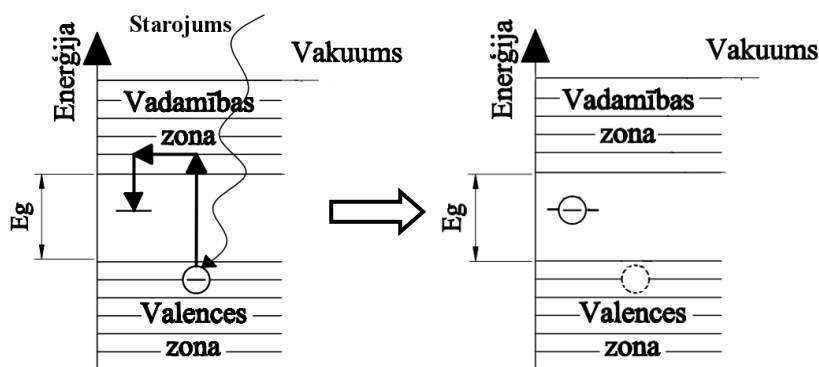
apstarojot LiF:Mg,Ti ar starojumu ar lielu jonizāciju blīvumu, un pētījuma autori izvirza hipotēzi, ka šī attiecība varētu korelē ar jonizāciju skaitu 2 nm lielā DNS molekulas segmentā.

2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

2.1. Priekšnosacījumi nanodozimetra izveidošanai

2.1.1. Nanodozimeta fizikālais pamatojums

Jonizējošais starojums ģenerē dozimetra materiālā kustīgus lādiņnesējus – elektronus, kuru koncentrācija ir atkarīga no absorbētās starojuma dozas. Šajā gadījumā ierosinātie elektroni pārvietojas vadāmības zonā tik ilgi, kamēr tie netiek notverti ķērājc centros, kas ir lokālie līmeņi aizliegtajā zonā (2.1. att.). Dozas mērījumiem ir nepieciešams ilgstoši saglabāt lokālajos līmeņos notverto lādiņu, tāpēc nanodozimetrā jābūt izgatavotam no dielektriķa vai pusvadītāja materiāla ar plašu aizliegto zonu. Ir iespējama arī pretēja situācija, kad materiālā uz lokālajiem līmeņiem pirms apstarošanas jau ir elektroni, jonizējošais starojums šos elektronus atbrīvo, un tie rekombinējas ar caurumiem, samazinot uz lokālajiem līmeņiem palikušo elektronu koncentrāciju.



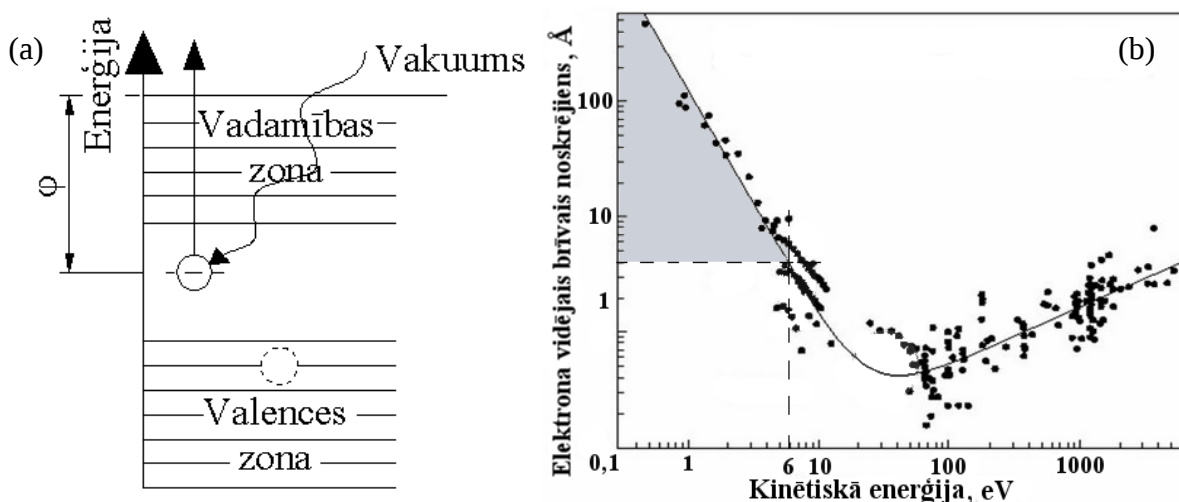
2.1. att. Jonizējošais starojums ierosina elektronu no valences zonas uz vadāmības zonu, kurā tas pārvietojas, kamēr relaksējas uz lokālajiem līmeņiem

Darbā par nanodozimeta starojuma jutīgiem elementiem tiek piedāvāts izmantot starojuma jutīgas nanodaļiņas, kuru izmērs ir atbilstošs DNS molekulas diametram (daži nanometri), lai ņemtu vērā starojuma piegādes mehānismus nanoattālumos. Nanodaļiņām jāatbilst šādām prasībām:

- 1) Lai efektīvi absorbētu jonizējošo starojumu, nanodaļiņām jābūt no materiāla ar augstu atomnumuru (Z-numurs).
- 2) Nanodozimetrā uzkrāta absorbētā doza nedrīkst samazināties laikā no dozas absorbcijas līdz dozas nolasīšanai, tāpēc nanodaļiņām jābūt no dielektriķa vai pusvadītāja – materiāla ar aizliegto zonu, lai ilgstoši saglabātu uz lokālajiem līmeņiem ierosinātus elektronus.
- 3) Lai nodrošinātu nanodaļiņu ķīmisko un fizikālo stabilitāti, nanodaļiņām jābūt ieslēgtām nanokārtiņā:
 - a) nanokārtiņai jābūt stabilai pret ārējām iedarbībām;
 - b) nanodaļiņu un nanokārtiņas materiāliem jābūt savstarpēji inertiem.

2.1.2. Dozas nolasīšana

Izmērot lokālajos līmeņos notverto elektronu daudzumu, ir iespējams novērtēt jonizējošā starojuma absorbēto dozu. Notvertos elektronus ir iespējams detektēt, izmantojot elektriskus kontakta vai bezkontakta mērījumus. Jebkurš kontakts, kas pievienots nanostrukturai, veido ar to robežvirsmu un ietekmē mērījumu rezultātus, palielinot dozas nolasīšanas kļūdu. Bezkontakta veidā notverto elektronu daudzumu var izmērīt, reģistrējot sliekšņa FE strāvu, ko ierosina ar ultravioletās (UV) gaismas fotoniem ar enerģiju 4–6 eV, kas tuva elektrona fotoelektriskajam izejas darbam no cietvielas [15]. Fotoelektriskais izejas darbs ϕ ir minimālā enerģija, kas jānodrošina elektronam, lai tas tiktu emitēts no cietvielas virsmas (2.2.(a) att.). Ja izejas darbs ir 4–6 eV, elektronam tiek nodrošināta kinētiskā enerģija ≤ 4 –6 eV, un tas tiek emitēts no virsmas slāņa dziļuma 0,3–10 nm (2.2.(b) att.) [15, 26, 45]. Dotais dziļums ir samērojams ar pētāmajiem nanoobjektiem (DNS molekulas diametru un nanodaļiņu diametru).



2.2. att. Fotoelektronu emisijas parametri

(a) fotoelektriskais izejas darbs; (b) elektrona brīvā noskrējiena vidējais garums cietvielās atkarībā no elektrona kinētiskās enerģijas [45]

Fotoelektriskā izejas darba ϕ vērtība 4–6 eV atbilst pusvadītājam [57], kas arī nosaka nanodaļiņu materiālu.

Pusvadītāju nanodaļiņām uz virsmas veidojas kristāliskā režģa defekti, kas ietekmē virsmas enerģijas līmeņu struktūru, tāpēc nanodaļiņas, kuras izmanto dažāda veida starojumu detektēšanai, jāieslēdz pasivējošā dielektriskā matricā ar plašu aizliegto zonu, lai pasargātu nanodaļiņu optiskās, elektriskās un ķīmiskās īpašības [2]. Kā arī dielektriskā matrica neļaus „notecēt” elektriskajam lādiņam, kas uzkrāsies nanodaļiņās jonizējošā starojuma iedarbībā.

2.2. Paraugi un pētījumu metodes

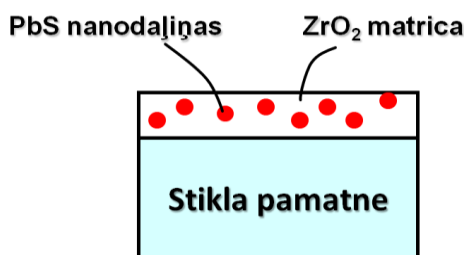
2.2.1. $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētas kārtiņas nanodozimetrijai

Nanodozimetrijas pētījumiem dotajā darbā tiek izmantotas $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētas kārtiņas, kurās par aktīvo elementu izmanto PbS nanodaļiņas. Svins ir materiāls ar augsto atomnumuru ($Z = 82$), un efektīvi absorbē starojumu. PbS nanodaļiņām piemīt stabilas fizikālas un ķīmiskās īpašības, un tās izmanto fotonikā saules enerģijas detektēšanai [29]. Ir

izstrādātas tehnoloģijas, kā stabilizēt PbS nanodaļiņu virsmu, ieslēdzot tās dielektriskajā stiklveidīgā ZrO₂ matricā [40].

ZrO₂:PbS nanostrukturētas kārtiņas tika pasūtītas un izgatavotas Ebreju Jeruzalemes Universitātē (Izraēla), Neorganiskās ķīmijas institūtā, prof. Renatas Reisfeldas vadībā (*Hebrew University of Jerusalem, Institute of Inorganic Chemistry, Prof. Renata Reisfeld*).

ZrO₂:PbS kārtiņas tika iegūtas, izmantojot sola-gēla metodi [42, 44]. ZrO₂:PbS kārtiņas tika uzklātas uz mikroskopijas priekšmetstikla pamatnes, kuras biezums ir 1 mm (2.3. att.). Sola gēla metodei ir sekojošas priekšrocības: paraugu iegūšana zemā temperatūrā, liela tīrības pakāpe, viendabīgums, ir iespējams izveidot nanodaļiņas iepriekš uzdotā koncentrācijā un ar iepriekš uzdotiem izmēriem, nav nepieciešams veidot ķīmiskās saites starp atsevišķām nanodaļiņām, lai saturētu tās kopā [8].



2.3. att. ZrO₂:PbS nanostrukturētas kārtiņas uz mikroskopijas priekšmetstikla pamatnes shematiskais attēlojums

ZrO₂:PbS kārtiņu iegūšana tika veikta secīgos posmos, kas aprakstīti avotā [44]:

- 1) ZrO₂ prekursora šķīduma pagatavošana.
- 2) PbS prekursora šķīduma pagatavošana.
- 3) ZrO₂:PbS šķīduma pagatavošana no ZrO₂ un PbS prekursora šķīdumiem.
- 4) ZrO₂:PbS kārtiņas uzklāšana uz mikroskopijas priekšmetstikla pamatnes. Stikla pamatni iemērc ZrO₂:PbS šķīdumā un izvelk ārā ar ātrumu 20 cm/min. Uzklāšana notiek istabas temperatūrā.
- 5) ZrO₂:PbS kārtiņas vienu stundu tiek žāvētas 40 °C temperatūrā.
- 6) ZrO₂:PbS kārtiņu atkvēlināšana 30 minūtes 200 °C temperatūrā.

Kārtiņas tika izgatavotas ar divām PbS molu daļām procentos – 20% un 50%. PbS molu daļas tiek rēķinātas attiecībā pret ZrO₂ + PbS molu daudzumu, pagatavojot ZrO₂:PbS šķīdumu (3. posms):

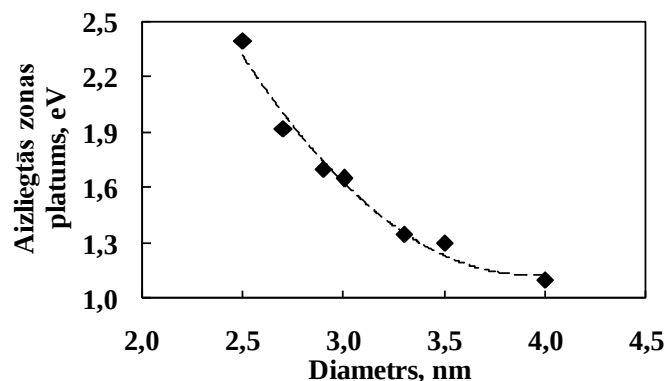
$$X_{PbS} = \frac{n_{PbS}}{n_{PbS} + n_{ZrO_2}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

kur X – vielas molu daļa procentos;
 n – vielas molu daudzums.

Pie PbS 50% molu daļas notiek PbS nanodaļiņu agregācija [42, 44], un tas nav izmantojams nanodozimētrijā, taču paraugi ar doto molu daļu attiecību tika izveidoti, lai noteiktu PbS materiālam raksturīgas FE īpašības, jo, palielinot PbS molu daudzumu, ZrO₂:PbS kārtiņu FE spektros pieaug FE signāls no PbS materiāla.

Lai noteiktu ZrO₂ materiālam raksturīgas FE īpašības, tika izgatavotas ZrO₂ kārtiņas bez PbS nanodaļiņām, uzklātās uz mikroskopijas priekšmetstikla pamatnes.

ZrO₂ matrica ir amorfais materiāls ar aizliegtas zonas platumu 5 eV [16, 44]. PbS nanodaļiņu aizliegtās zonas platums ir atkarīgs no to diametra (2.4. att.) [42].



2.4. att. PbS nanodaļiņu aizliegtās zonas platums atkarībā no to diametra [42]

Fotoelektriskais izejas darbs ϕ (eV) ir vienāds ar aizliegtās zonas platuma E_g (eV) un elektrontieksmes EA (eV) (no angļu val. *electron affinity*) summu [58]:

$$\phi = E_g + EA \quad (2.2)$$

ZrO₂ materiālam $EA \approx 2,5$ eV [41], PbS nanodaļiņām ar izmēriem 2,9–4,8 nm EA ir 3,5–4,0 eV attiecīgi [25]. Saskaņā ar formulu (2.2) un 2.4. att., $\phi_{\text{ZrO}_2} \approx 7,5$ eV, $\phi_{\text{PbS}} \approx 5,2$ eV. Tas nozīmē, ka izmantojot enerģijas 4–6 eV FE ierosināšanai, ir iespējams detektēt FE no PbS nanodaļiņām.

Iegūtie paraugi tika sagriezti līdz izmēram 25×10 mm, izmantojot dimanta griezni. Lai pārliecinātos, ka griešana nesabojāja paraugu virsmu, pēc sagriešanas paraugi vizuāli tika kontrolēti ar *Motic BA400* optisko mikroskopu [33] ar palielinājumu 200 reizes.

Pēc sagriešanas paraugiem tika veikta ultraskaņas attīrīšana 10 minūtes ultraskaņas vanniņā *Bandelin Sonorex RK31* [54], šķīdumā, kas sastāvēja no 96% etanola un destilētā ūdens tilpuma attiecībā 1:2. Pēc attīrīšanas paraugi tika žāvēti 3–5 s ar saspiesto slāpekli istabas temperatūrā.

2.2.2. ZrO₂:PbS nanostrukturēto kārtiņu raksturošana

Uz stikla pamatnes uzklāto ZrO₂:PbS kārtiņu biezuma un PbS nanodaļiņu diametru novērtēšana tika veikta, izmantojot SEM (skenējošā elektronu mikroskopija).

Lai saskatītu PbS nanodaļiņas, pirms mikroskopēšanas ZrO₂:PbS kārtiņas virsējais slānis tika nokodināts ar Ar⁺ joniem. Tika izvēlēta jonu kodināšana, jo tā nodrošina paraugu virsmas labāku tīrību, salīdzinot ar ķīmisko kodināšanu vai mehānisko pulēšanu. Ar⁺ jonu enerģija 5 keV, strāva 300 mA.

2.2.3. Fotoelektronu emisija kā dozas nolasīšanas metode

FE reģistrācija tika veikta vakuumā 5×10^{-5} Torr, istabas temperatūrā, izmantojot fotoemisijas spektrometru [1], kas nodrošina parauga virsmas fotostimulāciju un veic emitēto fotoelektronu strāvas reģistrāciju. Spektrometra [1] elektroniskā sistēma ļauj detektēt atsevišķus elektronus.

FE ierosināšanai tika izmantota 30 W deiterija lokizlādes lampa *ДДС-30*, kas nodrošina UV starojumu ar nepārtraukto spektru viļņa garumu diapazonā 186–360 nm [50, 56]. FE ierosināšanai tika izmantoti viļņa garumi 200–270 nm. Ar viļņa garumiem lielākiem par 270 nm emisija vairs netika novērota, bet viļņa garumi mazāki par 200 nm absorbējas skābeklī [9] (UV starojuma ceļš no avota līdz ieejas vakuumkamerā nenotiek vakuumā). FE dati tika reģistrēti, izmantojot personālo datoru ar skaitīšanas karti *Hamamatsu M8784 Counting Board* [37].

2.2.4. Starojumi dozas piegādei

2.2.4.1. Nejonizējošais ultravioletais starojums

Lai iegūtu $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu FE signālu, kas atkarīgs no starojuma absorbcijas, kārtiņas tika apstarotas ar nejonizējošo UV starojumu un tika salīdzināti apstaroto un neapstaroto kārtiņu FE spektri.

UV starojumam piemīt lielāks absorbcijas koeficients nekā jonizējošam starojumam [38], līdz ar to UV starojums intensīvāk ietekmē no starojuma absorbcijas atkarīgu FE signālu nekā jonizējošais starojums. Nejonizējošais UV starojums tika izmantots kā jonizējošā starojuma modelis, lai iegūtu no starojuma absorbcijas atkarīgo FE signālu, kuru tālāk izmantot eksperimentos ar jonizējošo starojumu.

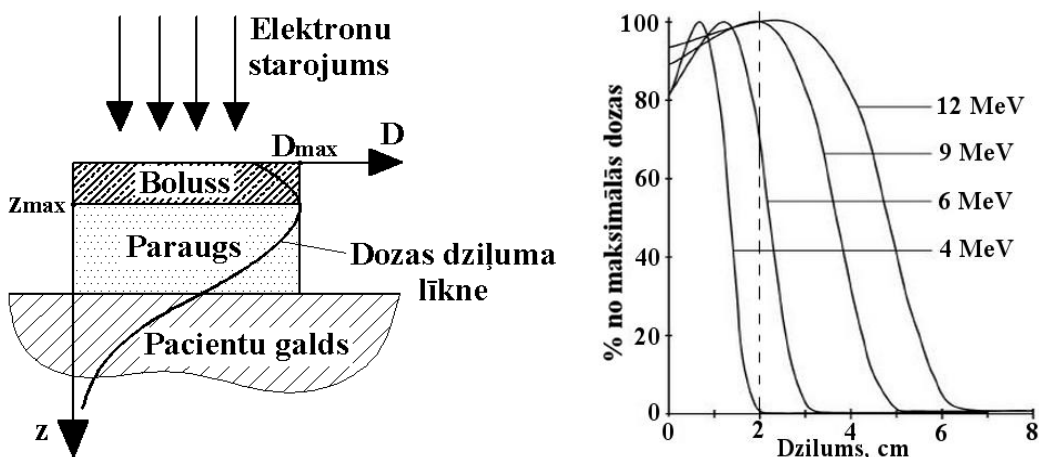
L8251 lampas UV starojuma maksimālā intensitāte ir diapazonā 300–400 nm [30]. Atšķirībā no *UVC-30* lampas UV starojuma, kuru izmantoja FE ierosināšanai no $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņām, L8251 lampas UV starojums ir nejonizējošais, jo FE no $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņām netika novērota ar viļņa garumiem lielākiem par 270 nm (2.2.3. apakšnodaļa). Tomēr nejonizējošā UV starojumā iedarbībā var notikt elektronu pārejas starp lokālajiem līmeņiem.

Paraugu apstarošana tika veikta 40 cm attālumā no UV lampas gaismas vada izejas, lai nepieļautu paraugu uzsilšanu. Šis attālums tika noteikts pirms apstarošanas eksperimentu sākuma, mērot temperatūru uz parauga virsmas ar termopāri. UV starojuma intensitāte 40 cm attālumā tika aprēķināta no L8222 lampas tehniskiem parametriem, un tā sastāda 5 mW/cm^2 . UV ekspozīcijas laiks bija no 5 līdz 75 minūtēm, paraugā absorbētā starojuma doza ir proporcionāla UV ekspozīcijas laikam.

2.2.4.2. Jonizējošais elektronu starojums

$\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņas tika apstarotas ar 9 MeV elektronu starojumu ar dozām 0–10 Gy. Dozas jauda bija 3 Gy/min, kas ir dozas jauda, izmantojama staru terapijā.

Kārtiņas tika novietotas uz lineārā paātrinātāja pacienta galda attālumā $\text{SSD} = 100 \text{ cm}$ (SSD – angļu valodā *source-skin distance*, attālums no starojuma avota līdz apstarojamai virsmai), starošanas lauks bija $10 \times 10 \text{ cm}$. Šādi parametri ir dozimetrisku testu standartapstākļi [14].



2.5. att. Dozas absorbcijas maksimuma nodrošināšana uz parauga virsmas
(a) izmantojot bolusu; (b) dozas dziļuma līknes tipiskām elektronu starojuma enerģijām [7]

Kad paraugs tiek apstarots ar elektronu starojumu, maksimālā dozas absorbcija notiek nevis uz parauga virsmas, bet dziļumā z_{max} . Lai nodrošinātu dozas maksimālo absorbciju tieši

uz parauga virsmas, uz parauga virsmas uzliek bolusus – no audiem ekvivalentā materiāla izgatavotas plāksnes, kuru biezums ir vienāds ar z_{max} (2.5.(a) att.).

z_{max} vērtība ir atkarīga no elektronu starojuma enerģijas (2.5.(b) att.). Apstarošanai tika izmantoti bolusi ar biezumiem 0,5 un 1 cm, kurus var likt viens uz otra. Paraugu apstarošanai tika izvēlēts 9 MeV elektronu starojums, jo šajā gadījumā $z_{max} = 2$ cm, un ir iespējams precīzi piemēklēt bolusu biezumus.

2.2.5. $ZrO_2:PbS$ nanostrukturēto kārtiņu atkvēlināšana

Pirms dozimetra apstarošanas ir nepieciešams izdzēst dozimetrā uzkrāto dozu no iepriekšējām apstarošanas reizēm, t.i. nodrošināt, lai dozimetra materiāls atgrieztos savā pirmsapstarošanas stāvoklī. To var panākt ar atkvēlināšanu. Atkvēlināšanas temperatūra un laiks ir atkarīgi no izmantota dozimetra materiāla [18].

Gadījumā, ja apstarošanas laikā elektroni tiek ierosināti uz lokālajiem līmeņiem (2.1. att.), atkvēlināšanas laikā šiem elektroniem termiski tiek pievadīta enerģija, pietiekoša, lai tos atbrīvotu. Notiek atbrīvoto elektronu rekombinācija ar caurumiem, kas atrodas valences zonā, tādā veidā materiāls atgriežas savā pirmsapstarošanas stāvoklī [35]. Pretējā situācijā, ja starojums iztukšo lokālos līmeņus dozimetra materiālā, sildīšanas laikā elektroni no valences zonas tiek ierosināti uz lokālajiem līmeņiem.

Atkvēlināšanas metode tiek izmantota termoluminiscences dozimetros, lai vienlaicīgi nolasītu un izdzēstu dozimetrā absorbēto starojuma dozu [18].

Promocijas darbā tika izpētīta atkvēlināšanas metodes piemērotība dzēst $ZrO_2:PbS$ nanostrukturētās kārtiņās absorbēto elektronu starojuma dozu. Kārtiņu atkvēlināšana tika veikta fotoemisijas spektrometra vakuumkamerā, vakuumā 5×10^{-5} Torr. Atkvēlināšana vakuumā neļauj oksidēties $ZrO_2:PbS$ kārtiņu virsmai.

Sildīšana tika vadīta ar spektrometra temperatūras kontrolleru *Heat Wave Labs 101303-23* [23]. Sildīšanas lineārais ātrums sastādīja $10^\circ C/min$, kas nodrošināja $ZrO_2:PbS$ kārtiņu vienmērīgo uzsilšanu un novērša mehānisko spriegumu veidošanos kārtiņās. Kārtiņu dzišana pēc atkvēlināšanas līdz istabas temperatūrai notika vakuumā, dabiskajā ātrumā. Dzišanas ātrums bija lēnāks nekā sildīšanas ātrums.

3. REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS

3.1. Nanodaļiņu izmantošanas nanodozimetrijā teorētiskais pamatojums

Ja DNS molekula tiek modelēta kā cilindrs (1.1. att.), absorbētā doza veidojas no jonizācijām cilindrā iekšā. Šajā gadījumā absorbētās dozas izteiksmi (1.1) var uzrakstīt kā:

$$D = \frac{dE}{dm} = \frac{dE}{d(V \cdot \rho)} = \frac{dE}{d(\pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \rho)}, \quad (3.1)$$

kur V – cilindra tilpums, nm^3 ;
 ρ – cilindra blīvums, g/nm .

Absorbētā doza ir atkarīga no apstarojama mērķa rādiusa r (izteiksme (3.1)) un attālumā x (1.1. att.), un ir iespējami divi dozas piegādes mehānismi. Ja $x > r$, jonizācijas cilindra iekšā veidojas sekundāro elektronu dēļ, kurus rada primārā starojuma daļiņa. Ja attālums $x \leq r$, jonizācijas cilindra iekšā veidojas, pārsvarā pateicoties tiešajai mijiedarbībai ar primārā starojuma daļiņu. Līdz ar to, lai pareizi izmērītu nanoobjektā absorbēto dozu, jāizmanto dozimetrs, kas ņem vērā dozas piegādes mehānismus, tāpēc dozimetra izmēram jābūt samērojamam ar nanoobjekta izmēru.

Absorbēto dozu arī ietekmē starojuma fotoni, kas izkliedējas uz mērķa tilpuma virsmas:

$$D = D_{\text{tilpums}} + D_{\text{virsmas}}, \quad (3.2)$$

kur D_{tilpums} – tilpumā absorbētā doza, Gy;

D_{virsmas} – tilpumā absorbētā doza, kas veidojas, fotoniem izkliedējoties uz virsmas, Gy.

D_{tilpums} ir proporcionāla mērķa tilpumam, bet D_{virsmas} ir proporcionāla mērķa virsmas laukumam:

$$D_{\text{tilpums}} \sim V; \quad V = \pi r^2 \cdot h \quad (3.3)$$

$$D_{\text{virsmas}} \sim S; \quad S = 2\pi r \cdot (h + r) \quad (3.4)$$

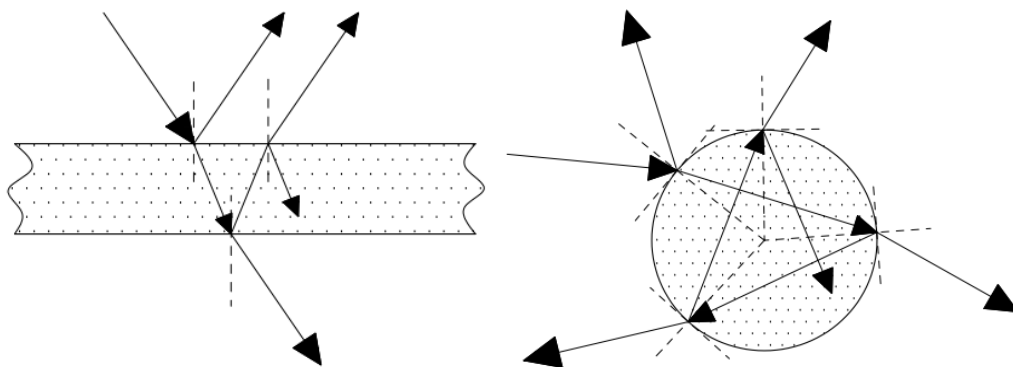
kur S – cilindriskā mērķa virsmas laukums, nm^2 .

Virsmas ieguldījums absorbētajā dozā:

$$D_{\text{virsmas}}/D_{\text{tilpums}} \sim S/V, \quad (3.5)$$

$$\frac{S}{V} = \frac{2\pi r(h+r)}{\pi r^2 \cdot h} = \frac{2(h+r)}{rh} = \frac{2}{r} + \frac{2}{h} \quad (3.6)$$

No formulām (3.5) un (3.6), ja $r \rightarrow 0$, $(D_{\text{virsmas}} / D_{\text{tilpums}}) \rightarrow \infty$. Var secināt, ka, samazinot r , ievērojami palielinās uz virsmas izkliedēto fonu ieguldījums absorbētajā dozā. Līdz ar to, bioloģisko nanoobjektu gadījumā ($r \rightarrow 0$) absorbētās dozas mērīšanai nav iespējams izmantot makro vai mikro izmēra dozimetrus, bet jāizmanto nano izmēra dozimetri.



3.1. att. Elektromagnētiskā starojuma ceļa salīdzinājums plakanajā objektā un sfērā

Tradicionālajā dozimetrijā absorbētās dozas mērīšanai izmanto dozimetrus, izgatavotus no makroizmēra materiāla. 3.1. att. ir salīdzināts elektromagnētiskā starojuma ceļš makroizmēra materiālā un materiālā ar nanoizmēra elementiem, kuru var modelēt ar tajā izkliedētām sfērām. Sfēriskajā objektā absorbētā doza būs lielākā nekā plakanajā objektā absorbētā doza, jo notiek daudzkārtējā iekšējā atstarošanās no sfēras sienām. Turklāt, atstarošanās notiks no blakus esošām sfērām. Tāpēc nanodozimetram jābūt izgatavotam no nanodaļiņām, lai ņemtu vērā absorbētās dozas piegādes mehānismos nanometru attālumos.

3.2. Nanodozimetra praktiskā realizācija

Pamatojoties uz teorētiskajiem secinājumiem un ņemot vērā literatūrā pieejamo informāciju, dotajā darbā tika iegūti PbS nanodaļiņu masīvi ZrO_2 matricā, kas tālāk izmantoti nanodozimetra praktiskai izpētei.

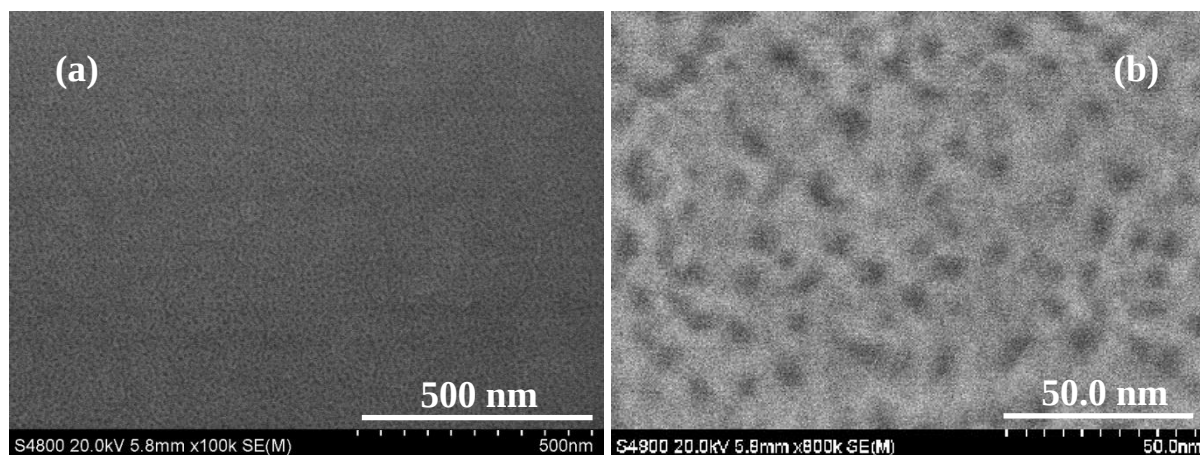
Iegūto $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanokārtiņu biezums tika noteikts, izmantojot SEM. $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ paraugs tika sagriezts uz pusi ar dimanta griezni, un SEM mikroskopijas veikšanai paraugs tika iestiprināts vertikāli paraugu turētājā ar griezto šķautni augšā. Kārtiņas biezums sastādīja 330 nm.

PbS nanodaļiņu diametru analīzei tika izmantotas kārtiņas tikai ar PbS 20% molu daļu ($\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$), jo kārtiņām ar PbS 50% molu daļu notiek PbS nanodaļiņu agregācija, un nav iespējams atšķirt atsevišķas nanodaļiņas.

Veicot PbS nanodaļiņu izmēru analīzi, izmantojot SEM mikroskopijas metodi, tika konstatēts, ka PbS nanodaļiņas nav iespējams ieraudzīt, jo tās ir nosegtas ar ZrO_2 matricu.

Lai atsegtu PbS nanodaļiņas no ieslēdzošas ZrO_2 matricas, $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņas tika kodinātas ar Ar^+ joniem. Eksperimentāli tika noteikts, ka kārtiņa tiek pilnībā nokodināta 360 s laikā. Izmantojot izmērīto kārtiņas biezumu, kārtiņas kodināšanas ātrums ir $330/6 = 55$ nm/min. ZrO_2 un PbS materiālu kodināšana notiek ar dažādiem ātrumiem, līdz ar to $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņā tiek atklātas PbS nanodaļiņu lokācijas vietas, kas izskatās kā poras, pēc kuru diametra un novietojuma ir iespējams noteikt PbS nanodaļiņu diametrus un nanodaļiņu novietojumu vienā plaknē.

3.2. att. apskatāmas $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņas dažādos palielinājumos. PbS nanodaļiņu lokāciju vietas ir saskatāmas kā tumšas poras. SEM attēlos ir redzams, ka nanodaļiņas ir savstarpēji atdalītas un neveido aglomerātus.



3.2. att. $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņu virsmas SEM attēli dažādos palielinājumos pēc 5 min jonu kodināšanas:

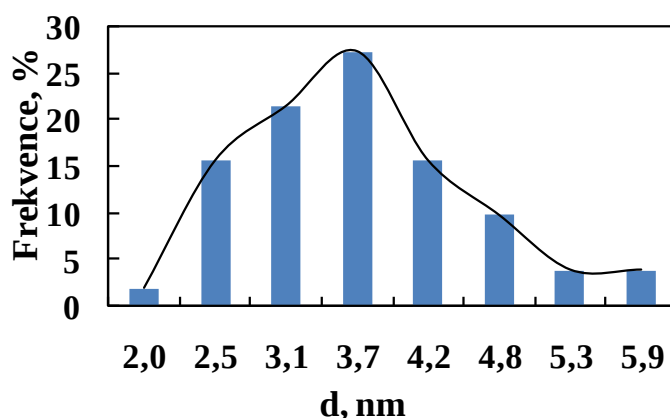
(a) mērogs 500 nm; (b) mērogs 50 nm

Lai noteiktu PbS nanodaļiņu diametrus un diametru sadalījumu, 3.2.(b) att. tika apstrādāts ar *ImageJ* attēlu apstrādes programmu. Tika iegūts nanodaļiņu skaits un katras nanodaļiņas šķērsriezuma laukums. Veicot nanodaļiņu formas aproksimāciju uz apaļo, nanodaļiņu diametrs tika aprēķināts:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{S}{3,14}} \quad (3.7)$$

kur d – nanodaļiņu diametrs, nm;
 S – nanodaļiņu šķērsriezuma laukums, nm^2 .

Izmantojot *Ms Excel Data Analysis/Histogram* rīku, tika iegūta nanodaļiņu diametru sadalījuma histogramma (3.3. att.).



3.3. att. PbS nanodaļiņu diametru sadalījuma histogramma $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņā

Jāņem vērā, ka kodināšanas procesos ir iespējama nanodaļiņu vietu paplašināšanās, līdz ar to ar SEM metodi iegūtie nanodaļiņu izmēri tika salīdzināti ar literatūrā pieejamiem datiem par analogiski sintezētām nanodaļiņām, kur nanodaļiņu diametri tika iegūti, izmantojot TEM (caurstarojošā elektronu mikroskopija, angl.val. *transmission electron microscopy*) un optiskās absorbcijas metodes. Literatūrā PbS nanodaļiņām, kas veidotas ar 20% molu daļu un pēc izgatavošanas atkvēlinātām 200 °C temperatūrā, nanodaļiņu diametrs uzrādīts diapazonā 2,5–4,5 nm [40, 42, 43, 44]. Mērījumi, kas veikti, izmantojot SEM attēlus, uzrāda, ka nanodaļiņu diametrs ir 2,5–4,8 nm robežās (pārsniedzot 5% frekvenci), kas sakrīt ar literatūra pieejamiem datiem. Var secināt, ka SEM metodika var būt izmantota nanodaļiņu diametru un nanodaļiņu savstarpēja novietojuma noteikšanai. TEM metodika dotajiem paraugiem uz stikla pamatnes nevar būt izmantota, jo paraugu biezums neļauj elektroniem iziet caur kārtiņas un pamatnes slāņiem.

3.3. Fotoelektronu emisijas spektru vispārīga apstrāde

Reģistrējot FE strāvu, tika iegūts emitēto elektronu skaits laika vienībā I (el/s) atkarībā no ierosinošā UV starojuma viļņa garuma λ (nm). Starojuma enerģija E elektronvoltos (eV) [3]:

$$E = 1240 / \lambda \quad (3.8)$$

FE strāva ir proporcionāla elektromagnētiskā starojuma intensitātei (Stoletova likums) [3], līdz ar to, veicot FE spektru apstrādi, jāņem vērā FE ierosinošās *ДІС-30* deiterija lampas atšķirīga relatīvā intensitāte dažādos viļņa garumos. Reģistrētai emisijas strāvai I vienmēr tika lietota korekcijas funkcija (3.9), kas ņem vērā lampas starojuma relatīvo intensitāti dažādos viļņa garumos:

$$N = I \cdot \frac{98}{-0,0000014222 \cdot \lambda^4 + 0,0017035071 \cdot \lambda^3 - 0,7547089233 \cdot \lambda^2 + 145,8426442567 \cdot \lambda - 10268,4967892118}, \quad (3.9)$$

kur N – koriģētā FE strāva, el/s.

FE strāva tika mērīta no 3 dažādiem punktiem uz parauga virsmas, kas tika izvēlēti pēc nejaušības principa. Pie katras starojuma enerģijas no iegūtiem mērījumu rezultātiem tika rēķināts vidējais aritmētiskais.

Tika novērtēta FE strāvas mērījumu vidējās aritmētiskās vērtības relatīvā standartklūda $S_N(\%)$ [4]:

$$S_N(\%) = \frac{S_N}{N} \cdot 100\% \quad (3.10)$$

kur N – FE strāvas mērījumu vidējā aritmētiskā vērtība, el/s;
 S_N – FE strāvas mērījumu vidējās aritmētiskās vērtības standartklūda, el/s.

FE strāvas mērījumu vidējās aritmētiskās vērtības standartklūda [4]:

$$S_N = \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (3.11)$$

kur $n=3$ – mērījumu skaits;
 S – FE strāvas mērījumu standartnovirze, el/s.

FE strāvas mērījumu standartnovirze [4]:

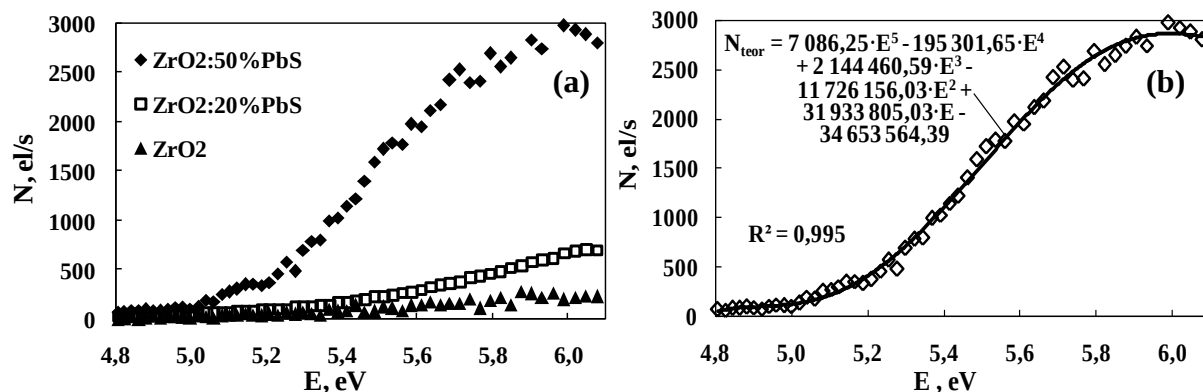
$$S = \sqrt{\frac{\sum N_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n N_i\right)^2}{n}}{n-1}}, \quad (3.12)$$

kur N_i – FE strāva, kas mērīta no viena punkta uz parauga virsmas, el/s.

FE vidējās aritmētiskās vērtības N relatīvā standartklūda $S_N(\%)$ nepārsniedza 15% emisiju ierosinošo fotonu enerģijas diapazonā virs 4,8 eV.

3.4. PbS nanodaļiņu ietekme uz $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētu kārtiņu fotoelektronu emisiju

Lai izdalītu ar PbS nanodaļiņām saistītu FE signālu no $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņas FE spektra, tika salīdzināta FE emisija no ZrO_2 , $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ un $\text{ZrO}_2\text{:50\%PbS}$ materiāliem (3.4.(a) att.). Pieaugot PbS nanodaļiņu koncentrācijai kārtiņās, pieaug FE intensitāte. FE tika novērota arī ZrO_2 kārtiņai, neskatoties uz to, ka ZrO_2 materiālam fotoelektronu izejas darba lielums pārsniedz FE ierosināšanai izmantoto fotonu enerģijas vērtības (2.2.1. apakšnodaļa). Iespējams, reģistrētā FE ir saistīta ar defektiem, kas piemīt ZrO_2 struktūrai [16].



3.4. att. Kārtiņu FE spektri:
(a) ZrO_2 , $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ un $\text{ZrO}_2\text{:50\%PbS}$ kārtiņu FE spektri; (b) $\text{ZrO}_2\text{:50\%PbS}$ kārtiņas FE spektra aproksimācija ar 5. kārtas polinomu

Lai vienkāršotu turpmāko aprēķinu veikšanu, FE spektri tika aproksimēti ar 5. kārtas polinomu, izmantojot MS Excel programmatūras Trendline rīku (determinācijas koeficients $R^2 = 0,99$). Aproksimācijas rezultātā FE spektrs tiek nogludināts, zaudējot spektra smalkas sastāvdaļas, tomēr saglabājas FE spektra pamatforma, kuru var izmantot, analizējot FE uzvedību plašā enerģijas diapazonā. 3.4.(b) att. kā piemērs ir parādīta $\text{ZrO}_2:50\%\text{PbS}$ kārtiņas spektra aproksimācija ar 5. kārtas polinomu.

Polinomiālās aproksimācijas vidējā kļūda A visos eksperimentos nepārsniedza 10%, tā tika rēķināta pēc formulas [4]:

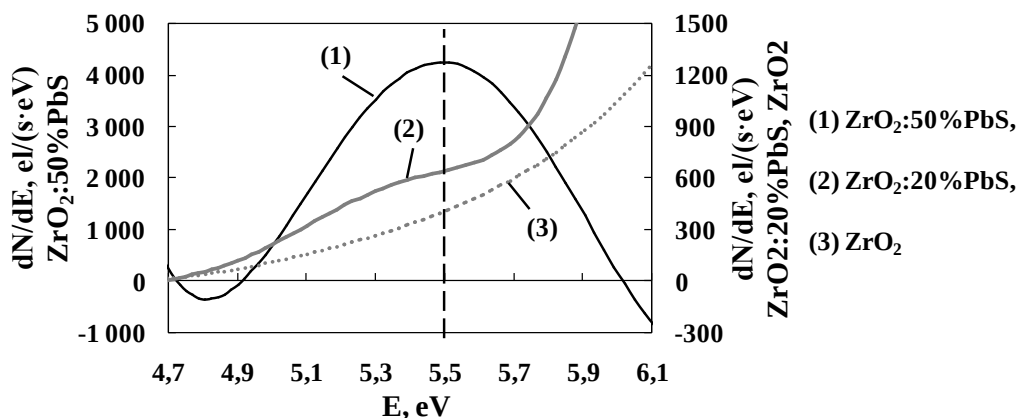
$$A = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n |N_i - N_{\text{teor},i}|}{N_i} \cdot 100\% \quad (3.13)$$

kur N_i – FE strāvas vērtība, kas tika izmērīta eksperimentā pie attiecīgā E_i , el/s;
 $N_{\text{teor},i}$ – teorētiskā FE strāvas vērtība, kas aprēķināta no 5.kārtas polinomiālā aproksimācijas vienādojuma pie attiecīgā E_i , el/s;
 n – punktu skaits, kas tika aproksimēti ar 5. kārtas polinomu.

No polinomiālās aproksimācijas vienādojuma (3.14) tika aprēķināti FE spektru atvasinājumi dN/dE (formula (3.15)). Aproksimācijas vienādojuma koeficienti tika aprēķināti, izmantojot MS Excel LINEST funkciju. FE spektru atvasinājumi raksturo aktīvo FE centru koncentrāciju [10].

$$N = a \cdot E^5 + b \cdot E^4 + c \cdot E^3 + d \cdot E^2 + e \cdot E + f \quad (3.14)$$

$$dN/dE = 5 \cdot a \cdot E^4 + 4 \cdot b \cdot E^3 + 3 \cdot c \cdot E^2 + 2 \cdot d \cdot E + e \quad (3.15)$$

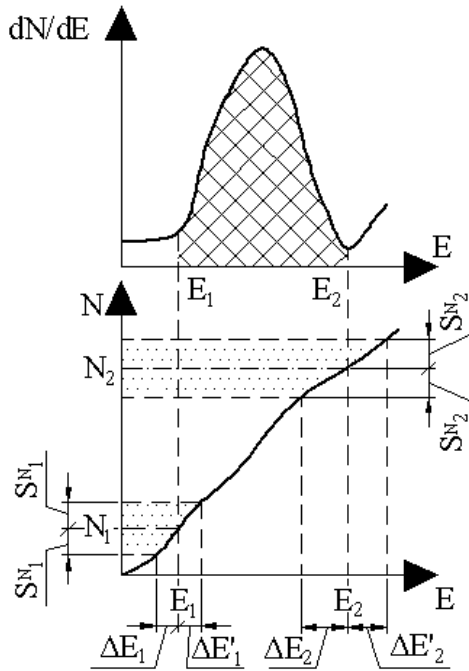


3.5. att. $\text{ZrO}_2:50\%\text{PbS}$, $\text{ZrO}_2:20\%\text{PbS}$ un ZrO_2 kārtiņu FE spektru atvasinājumi

Lai novērtētu PbS nanodaļiņu klātbūtnes ietekmi uz aktīvo FE centru veidošanos, tika salīdzināti ZrO_2 , $\text{ZrO}_2:20\%\text{PbS}$ un $\text{ZrO}_2:50\%\text{PbS}$ kārtiņu FE spektru atvasinājumi (3.5. att.). $\text{ZrO}_2:50\%\text{PbS}$ kārtiņai FE spektru atvasinājumos ir maksimums pie enerģijas 5,5 eV, tā platums ir 4,9–6,0 eV. Tas norāda, ka kārtiņā pie enerģijas 5,5 eV ir vislielākā FE aktīvo centru koncentrācija. $\text{ZrO}_2:20\%\text{PbS}$ kārtiņai FE spektru atvasinājumam pie 5,5 eV ir pārliekuma punkts, kas nozīmē, ka arī šajā kārtiņā pastāv aktīvie FE centri pie 5,5 eV, tomēr to koncentrācija ir mazāka nekā $\text{ZrO}_2:50\%\text{PbS}$ kārtiņā, kurai pie šīs enerģijas ir novērots izteikts maksimums. ZrO_2 kārtiņai maksimums pie 5,5 eV nav novērots, tas liecina, ka aktīvie FE centri ar enerģiju 5,5 eV veidojas, tāpēc ka struktūrā atrodas PbS nanodaļiņas.

No 3.5. att. var secināt, ka PbS nanodaļiņas nodrošina atšķirīgu atvasinājuma maksimumu nekā ZrO_2 kārtiņa, PbS nanodaļiņu koncentrācijas izmaiņa ietekmē dN/dE līknes

augstumu, un, lai izdalītu ar PbS nanodaļiņām saistītu FE signālu no $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņas FE spektriem, jāanalizē FE spektri enerģijas diapazonā 4,9–6,0 eV.



3.6. att. Laukums zem FE spektru atvasinājumiem, rēķināts diapazonā no E_1 līdz E_2 , ir vienāds ar FE strāvas pieaugumu intervālā no E_1 līdz E_2

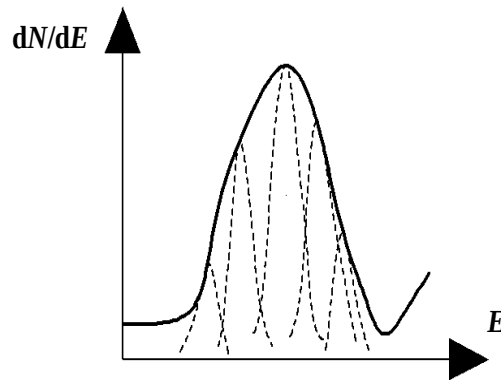
Laukums zem FE spektru atvasinājumiem dN/dE , rēķināts diapazonā no E_1 līdz E_2 , ir tieši proporcionāls šajā diapazonā emitēto elektronu skaitam [10], un tas ir vienāds ar FE strāvas pieaugumu intervālā no E_1 līdz E_2 (3.6. att.):

$$\int_{E_1}^{E_2} \frac{dN}{dE} dE = N_2 - N_1 = \delta N \quad (3.16)$$

FE strāvas vērtībai N_i ir standartklūda $\pm S_{Ni}$ (formula (3.11)). Izmantojot ar 5. kārtas polinomu aproksimētos FE spektrus, tika noteikts spektru enerģijas diapazons no $(E_i - \Delta E_i)$ līdz $(E_i + \Delta E_i')$, kas atbilst FE strāvas vērtībām no $(N_i - S_{Ni})$ līdz $(N_i + S_{Ni})$, un tad tika aprēķināts vidējais aritmētiskais $\bar{N}_i$ no FE strāvas vērtībām, kas tika reāli izmērītas šajā diapazonā. FE strāvas pieaugums δN tika aprēķināts kā vidējo aritmētisko vērtību $\bar{N}_2$ un $\bar{N}_1$ starpība:

$$\delta N = \bar{N}_2 - \bar{N}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \Big|_{E_2 - \Delta E_2}^{E_2 + \Delta E_2'}}{n} - \frac{\sum_{i=1}^m N_i \Big|_{E_1 - \Delta E_1}^{E_1 + \Delta E_1'}}{m}, \quad (3.17)$$

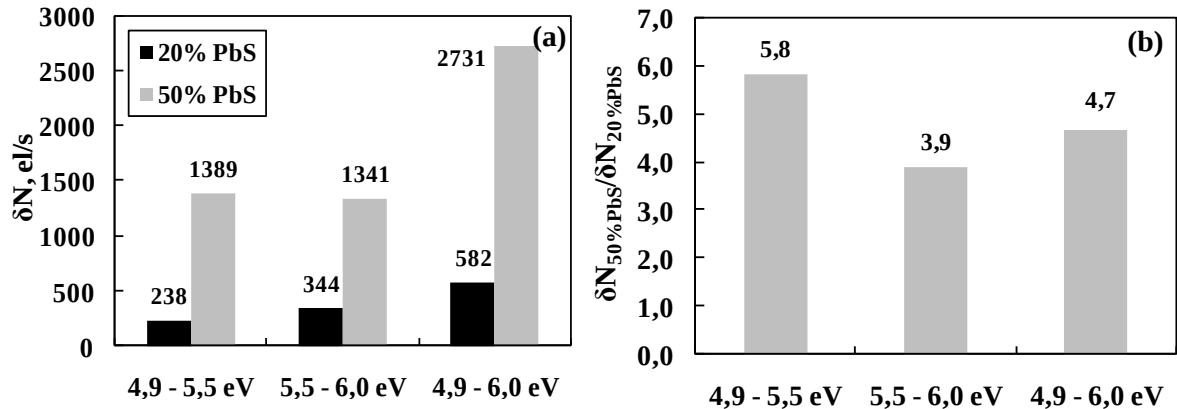
kur n – FE mērījumu punktu skaits enerģijas diapazonā no $(E_2 - \Delta E_2)$ līdz $(E_2 + \Delta E_2')$;
 m – FE mērījumu punktu skaits enerģijas diapazonā no $(E_1 - \Delta E_1)$ līdz $(E_1 + \Delta E_1')$.



3.7. att. Maksimuma veidošanās FE spektru atvasinājumos no dažu atsevišķu FE aktīvo centru superpozīcijas shematiskais attēls

Ir iespējama situācija, kad maksimums FE spektru atvasinājumos veidojas no dažu atsevišķu FE aktīvo centru superpozīcijas, kuru skaits un atrašanās enerģija nav zināmi (3.7. att.). Nanodozimetrijas nolūkam ir svarīgi izdalīt tikai tos centrus, kuri sniedz lielāko PbS nanodaļiņu veidoto FE signālu. Lai pārbaudītu pieņēmumu, ka dažādi emisijas centriem sniedz lielāku PbS nanodaļiņu signālu nekā citi, maksimums no 3.5. att. tika sadalīts uz pusplatumiem enerģijas diapazonos 4,9–5,5 eV un 5,5–6,0 eV, un katrs pusplatums tika analizēts atsevišķi. Kā arī tika analizēts maksimuma pilnais platums enerģijas diapazonā 4,9–6,0 eV.

Katram enerģijas diapazonam tika aprēķināts lielums δN (formula (3.17)) un tika salīdzinātas lieluma δN vērtības $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņām ar 20% un 50% PbS molu daļām (3.8.att.).



3.8. att. $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņu ar 20% un 50% PbS molu daļu FE strāvas pieaugums, rēķināts dažādos enerģijas diapazonos:

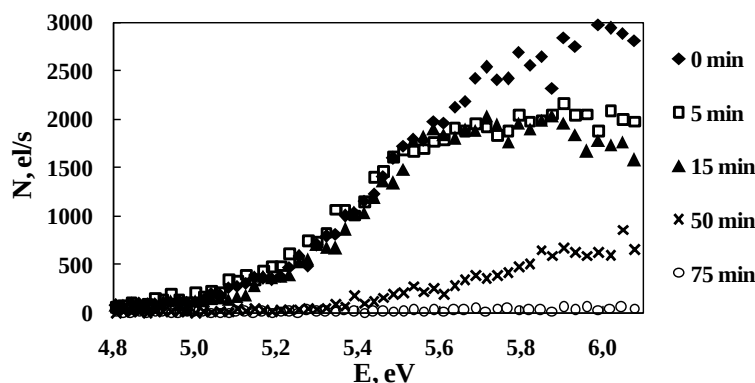
(a) absolūtās vērtības; (b) FE strāvas pieauguma attiecība kārtiņām ar PbS 50% un 20% molu daļām

3.8. att. ir redzams, ka PbS nanodaļiņu koncentrācija visvairāk ietekmē FE strāvas pieaugumu diapazonā 4,9–5,5 eV, jo šajā diapazonā attiecība starp kārtiņām ar PbS 50% un 20% molu daļām ir vislielākā ($\delta N_{50\% \text{PbS}} / \delta N_{20\% \text{PbS}} = 1389 / 238 = 5,8$). Tas liecina, ka tieši enerģijas diapazonā 4,9–5,5 eV PbS nanodaļiņas sniedz vislielāko FE signālu.

3.5. Starojumu ietekme uz $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu fotoelektronu emisiju

3.5.1. Nejonizējošā UV starojuma ietekme uz $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu fotoelektronu emisiju

$\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņu FE intensitāte samazinās, pieaugot UV ekspozīcijas laikam. Kā piemērs ir parādīti FE spektri kārtiņām ar lielāko PbS 50% molu daļu (3.9. att.).

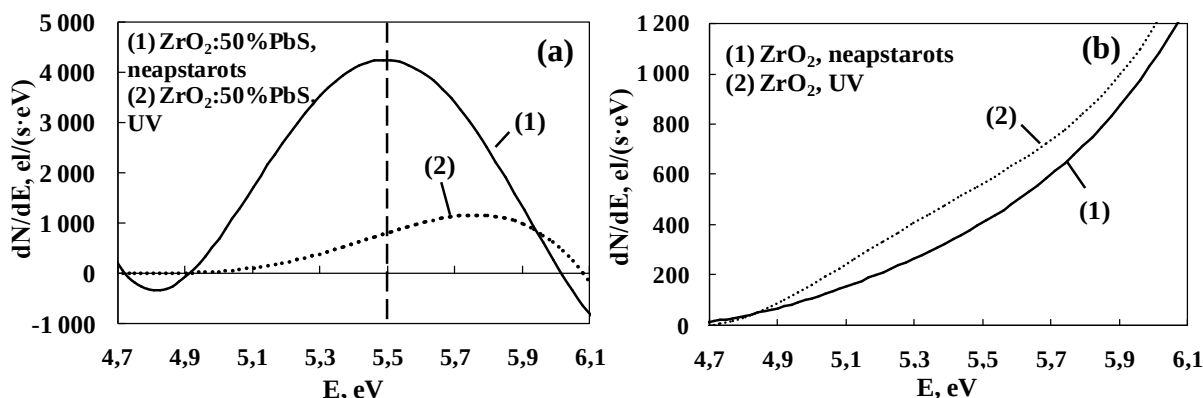


3.9. att. $\text{ZrO}_2\text{:50%PbS}$ kārtiņu FE spektri pie dažādiem UV ekspozīcijas laikiem

Lai pārbaudītu, vai starojuma absorbcija dažādi ietekmē ZrO_2 matricu un PbS nanodaļiņas, ar UV starojumu apstaroto $\text{ZrO}_2\text{:50%PbS}$ un $\text{ZrO}_2\text{:20%PbS}$ kārtiņu FE spektri tika salīdzināti ar UV starojumu apstarotās ZrO_2 kārtiņas FE spektriem.

Izmantojot formulas (3.13) un (3.14), $\text{ZrO}_2\text{:50%PbS}$, $\text{ZrO}_2\text{:20%PbS}$ un ZrO_2 kārtiņu FE spektriem tika aprēķināti atvasinājumi.

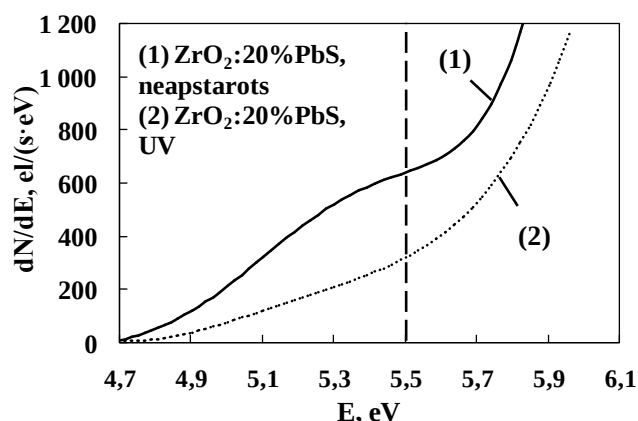
Lai novērtētu UV starojuma ietekmi uz ZrO_2 matricu un PbS nanodaļiņām, tika salīdzināti neapstaroto un ar UV starojumu 50 minūtes apstaroto $\text{ZrO}_2\text{:50%PbS}$ un ZrO_2 kārtiņu FE spektru atvasinājumi (3.10. (a) un (b) att.). $\text{ZrO}_2\text{:50%PbS}$ kārtiņai pēc apstarošanas maksimums pie 5,5 eV izzūd, kas nozīmē, ka kārtiņā UV starojuma iedarbībā samazinās aktīvo FE centru koncentrācija. ZrO_2 kārtiņa uz UV starojumu reaģē pretēji – šai kārtiņai pieaug emisijas centru koncentrācija pēc apstarošanas (to parāda dN/dE līknes augstums).



3.10. att. Neapstaroto un 50 minūtes ar UV starojumu apstaroto kārtiņu FE spektru atvasinājumi:

(a) $\text{ZrO}_2\text{:50%PbS}$ kārtiņa; (b) ZrO_2 kārtiņa

$\text{ZrO}_2\text{:20%PbS}$ kārtiņas FE spektru atvasinājumu izmaiņa pēc 50 min apstarošanas ar UV starojumu ir apskatāma 3.11. att. Pēc apstarošanas ar UV starojumu, līdzīgi kā $\text{ZrO}_2\text{:50%PbS}$ kārtiņai, aktīvo FE centru koncentrācija $\text{ZrO}_2\text{:20%PbS}$ kārtiņā samazinās.



3.11. att. Neapstaroto un ar UV starojumu 50 minūtes apstaroto $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņu FE spektru atvasinājumi

No 3.10. un 3.11. att. tika secināts:

1) UV starojums dažādi ietekmē PbS nanodaļiņas un ZrO_2 materiālu, līdz ar to no $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņu FE spektriem ir iespējams izdalīt PbS nanodaļiņu FE signālu, kuru ietekmē starojuma absorbcija.

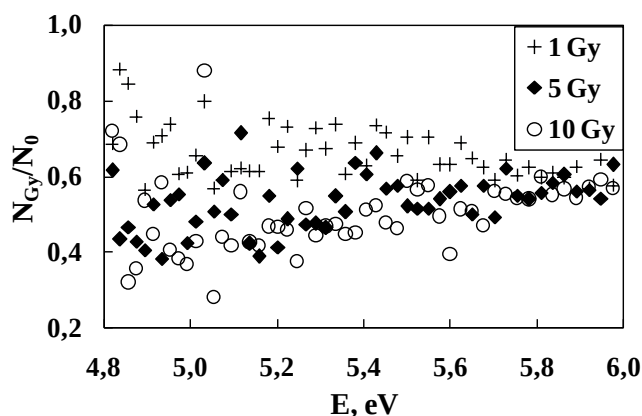
2) Starojuma absorbcija ietekmē PbS nanodaļiņu FE signālu jau pie PbS 20% molu daļas $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņā. Tas nozīmē, kā ir iespējams turpināt $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņu izpēti nanodozimetriskiem nolūkiem, izmantojot jonizējošo starojumu. (Savukārt, $\text{ZrO}_2\text{:50\%PbS}$ kārtiņas nebūtu iespējams izmantot nanodozimetrijā, jo PbS nanodaļiņas šajās kārtiņās nav savstarpēji atdalītas (atšķirībā no $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņām – 3.3. att.)).

3.5.2. Jonizējošā elektronu starojuma ietekme uz $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu fotoelektronu emisiju

Ar elektronu starojumu tika apstarotas $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņas. Savukārt, ZrO_2 un $\text{ZrO}_2\text{:50\%PbS}$ kārtiņas vairs netika izmantotas, jo abas šīs kārtiņas nav izmantojamas nanodozimetrijā, un eksperimentos ar UV starojumu tika noskaidrots, ka PbS nanodaļiņas sniedz FE signālu jau pie 20% molu daļu attiecības.

Eksperimentos ar elektronu starojumu katrs $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņu paraugs bija apstarots ar savu dozu, un katram paraugam tika salīdzināti FE spektri pirms un pēc apstarošanas.

FE intensitāte pēc apstarošanas ar elektronu starojumu samazinās, par ko liecina FE intensitāšu pēc un pirms apstarošanas attiecība ($N_{\text{Gy}}/N_0 < 1$) (3.12. att.).



3.12. att. $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņu FE intensitāšu attiecība pēc un pirms apstarošanas ar elektronu starojumu

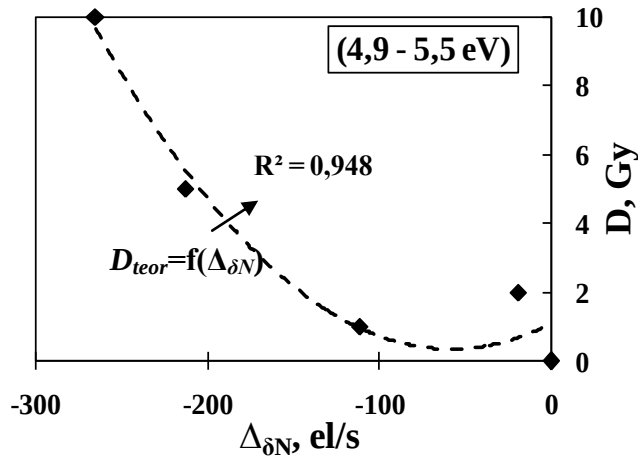
Iepriekš bija noskaidrots, ka vislielākais FE signāls no PbS nanodaļiņām veidojas enerģijas diapazonā 4,9–5,5 eV (3.8.(b) att.). Tomēr, lai pārliecinātos, ka jonizējošais elektronu starojums visvairāk iedarbojas tieši uz PbS nanodaļiņu veidotajiem FE emisijas centriem, tika pārbaudīti arī citi 3.8.(b) att. uzrādītie enerģijas diapazoni 5,5–6,0 eV un 4,9–6,0 eV.

Izmantojot formulu (3.17), diapazonos 4,9–5,5 eV, 4,9–6,0 eV un 5,5–6,0 eV tika aprēķināti FE strāvas pieaugumi pirms (δN_0) un pēc (δN_{Gy}) apstarošanas ar starojuma dozu. FE strāvas pieauguma izmaiņa pēc apstarošanas:

$$\Delta_{\delta N} = \delta N_{Gy} - \delta N_0 \quad (3.18)$$

Katram diapazonam tika veidota sakarība starp $\Delta_{\delta N}$ un piegādāto starojuma dozu D . Eksperimentālie punkti tika aprakstīti ar piemeklētu teorētisko līkni $D_{teor} = f(\Delta_{\delta N})$. Labākā sakritība starp eksperimentālajiem punktiem un teorētisko līkni ir novērota enerģijas diapazonam 4,9–5,5 eV, kas sakrīt ar PbS nanodaļiņu veidoto FE diapazonu (3.12. att.). Hipotēze, ka PbS nanodaļiņas var kalpot par nanodozimetra jutīgiem elementiem, apstiprinājās. Enerģijas diapazonam 4,9–5,5 eV sakarību starp D_{teor} un $\Delta_{\delta N}$ apraksta 2. kārtas polinoms:

$$D_{teor} = 2,168 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta_{\delta N}^2 + 2,517 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta_{\delta N} + 1,101 \quad (3.19)$$

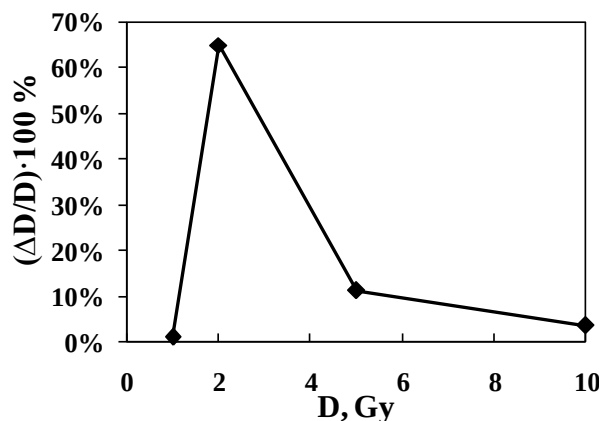


3.12. att. Sakarība starp $ZrO_2:20\%PbS$ kārtiņu FE strāvas pieauguma izmaiņu enerģijas diapazonā 4,9–5,5 eV un elektronu starojuma dozu

Vienādojums (3.19) ir $ZrO_2:20\%PbS$ kārtiņu nanodozimetra tarēšanas izteiksme, pēc kuras ir iespējams noteikt nanodozimetra absorbēto starojuma dozu, izmērot FE strāvas pieauguma izmaiņu pēc apstarošanas $\Delta_{\delta N}$.

3.5.3. Elektronu starojuma absorbētās dozas mērīšanas kļūda

Ievietojot tarēšanas izteiksmē (3.19) izmērītās $\Delta_{\delta N}$ vērtības, tika aprēķinātas teorētiskās dozas $D_{teor,i}$ un salīdzinātas ar piegādātām dozām D_i . Tarēšanas, jeb dozas mērīšanas kļūda, ir $\Delta D_i = |D_{teor,i} - D_i|$. Dozas mērīšanas relatīvā kļūda ir $\Delta D_i / D_i \cdot 100\%$ (3.13. att.).



3.13. att. Dozas mērīšanas relatīvā kļūda atkarībā no $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņās absorbētās elektronu starojuma dozas

Absorbētās dozas mērīšanas relatīvā kļūda samazinās no 65% līdz 11%, dozai palielinoties no 2 līdz 5 Gy. Dozas diapazonā 5–10 Gy dozas mērīšanas relatīvā kļūda nepārsniedz 11%.

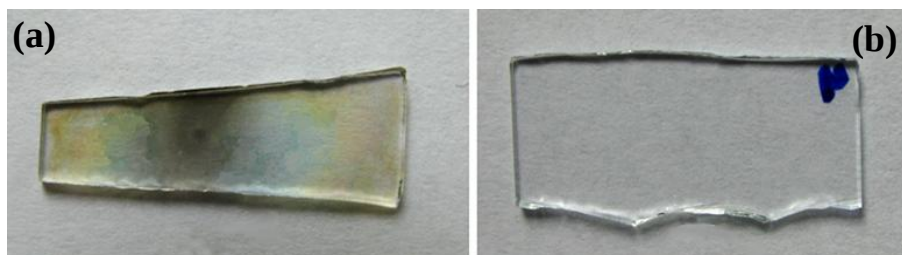
3.6. $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu atjaunošana pēc apstarošanas ar elektronu starojumu

3.6.1. Atkvēlināšanas temperatūras izvēle

Ar elektronu starojumu apstaroto $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņu atkvēlināšana ir jāveic pēc iespējas lielākā temperatūrā, lai nodrošinātu FE aktīvo centru efektīvu atjaunošanu pirmsapstarošanas stāvoklī. Tomēr temperatūra nedrīkst būt pārāk liela, lai nepieļautu kārtiņu bojāšanu.

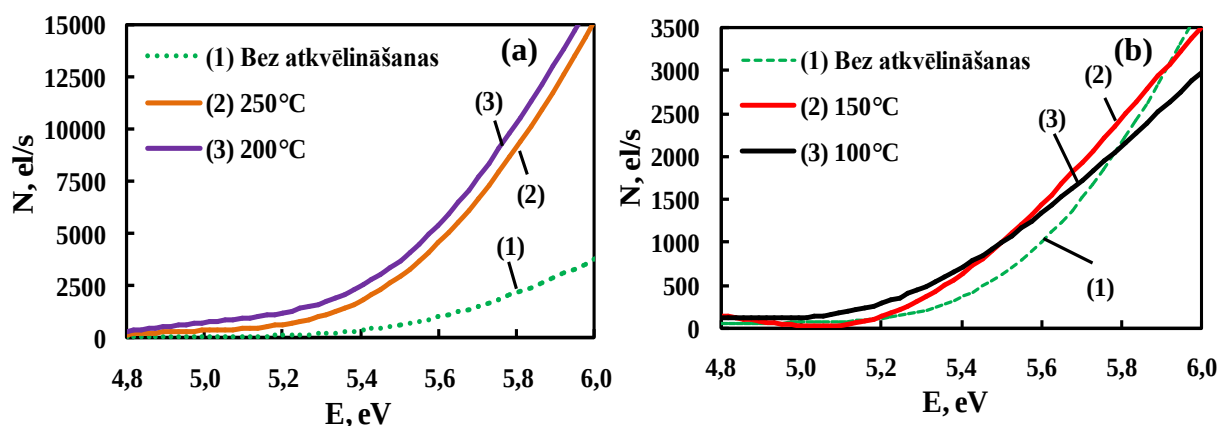
Lai noteiktu maksimālo temperatūru, kurā var atkvēlināt nanostrukturētās kārtiņas, atkvēlināšana tika veikta kārtiņām, kas nebija apstarotas ar jonizējošo starojumu. Tika mērīta FE pirms un pēc kārtiņu atkvēlināšanas. Ja kārtiņa netiek bojātā atkvēlināšanas laikā, FE intensitāte paliek nemainīga pēc atkvēlināšanas.

Izgatavošanas laikā $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņas tika atkvēlinātas 30 minūtes $200\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrā (2.2.1. apakšnodaļa), tāpēc sākumā tika pārbaudītas līdzīgas atkvēlināšanas temperatūras $200\text{ }^\circ\text{C}$ un $250\text{ }^\circ\text{C}$. Kārtiņu stāvoklis pēc atkvēlināšanas tika kontrolēts gan vizuāli, gan mērot FE spektrus. Pēc atkvēlināšanas $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņa kļuva brūna (3.14.(a) att.). Lai pārbaudītu, vai krāsas izmaiņa ir saistīta ar kārtiņas bojāšanu nevis ar citiem nekontrolējamiem faktoriem, identiskos apstākļos kā $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ tika atkvēlināta stikla pamatne. Stikla virsma vizuāli neizmainījās pēc atkvēlināšanas (3.14.(b) att.), kas liecina par to, ka izmaiņas $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņā ir saistītas ar nepiemēroto atkvēlināšanas temperatūru.



3.14. att. Paraugu, atkvēlināto 30 minūtes $250\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrā, vizuālais izskats
(a) $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņa, (b) stikla pamatne

Par $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņu bojāšanu liecina arī FE mērījumu rezultāti. Kārtiņu FE spektri, kas tika izmērīti pēc 7 dienām pēc atkvēlināšanas, apskatāmi 3.15.(a) att. Spektri tika aproksimēti ar 5. kārtas polinomu, izmantojot *MS Excel* programmatūras *Trendline* funkciju (determinācijas koeficients $R^2 = 0,99$). Atkvēlināto kārtiņu FE strāva bija 5 reizes lielāka par neatkvēlinātās kārtiņas FE strāvu, kas liecina, ka atkvēlināšanas laikā kārtiņas tika sabojātas, un šis bojājums ir ievērojams, jo atkvēlināto kārtiņu FE spektri arī pēc 7 dienām ir atšķirīgi no neatkvēlinātās kārtiņas FE spektriem.



3.15. att. $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņu FE spektri pie dažādām atkvēlināšanas temperatūrām
(a) 30 minūtes 200 °C un 250 °C temperatūrās; (b) 30 minūtes 100 °C un 150 °C temperatūrās

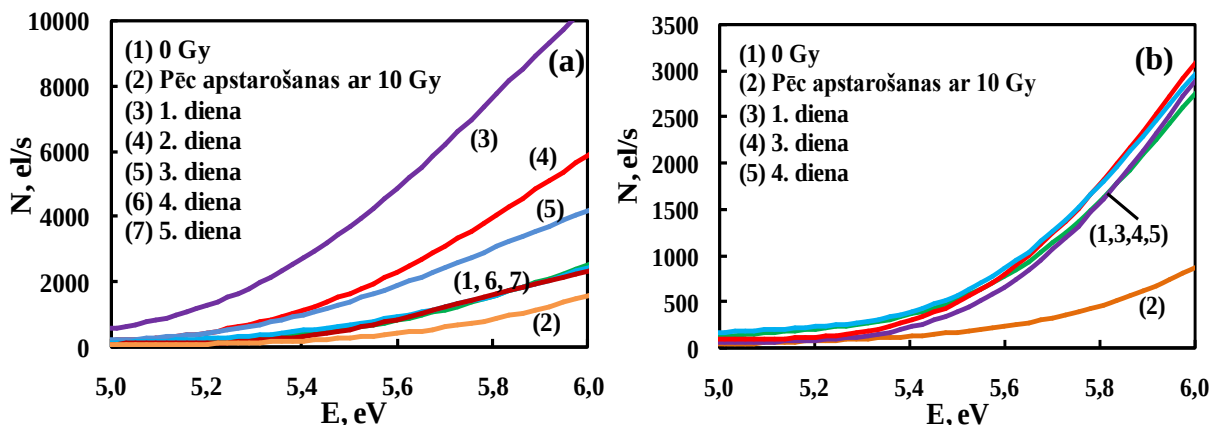
Tālāk tika pārbaudītas zemākas atkvēlināšanas temperatūras 100 °C un 150 °C. Vizuāli novērtējot $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņu stāvokli, tika konstatēts, ka atkvēlināšana 150 °C temperatūrā neizmainīja kārtiņu krāsu. FE mērījumi, kas veikti pēc 7 dienām pēc atkvēlināšanas, arī parāda, ka kārtiņu atkvēlināšana temperatūras 150 °C un 100 °C nebojā kārtiņas, jo atkvēlināto kārtiņu FE spektri sakrīt ar neatkvēlināto kārtiņu FE spektriem (3.15.(b) att.). Turpmākiem atkvēlināšanas eksperimentiem kā optimālākā temperatūra tika izvēlēta 150 °C.

3.6.2. Fotoemisijas spektru izmaiņa laikā pēc atkvēlināšanas

Lai pārbaudītu atkvēlināšanas ietekmi uz $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņu FE stabilitāti, tika veikti sekojošie eksperimenti:

- FE mērījumi no neapstarotām $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņām.
- Kārtiņu apstarošana ar elektronu starojuma dozu 10 Gy.
- FE mērījumi no apstarotām kārtiņām.
- Kārtiņu atkvēlināšana 30 minūtes 150 °C temperatūrā un atdzišana dabiskajā ātrumā līdz istabas temperatūrai.
- FE mērījumi pēc atkvēlināšanas.

Pēc apstarošanas ar elektronu starojumu $\text{ZrO}_2\text{:20\%PbS}$ kārtiņas FE intensitāte samazinās (3.16.(a) att. – (2)), salīdzinot ar neapstarotās kārtiņas FE intensitāti (1). Apstarotas kārtiņas FE intensitāte, mērīta nākamajā dienā pēc atkvēlināšanas (3), ir 5 reizes lielākā nekā neapstarotas kārtiņas FE intensitāte (1). Nākamajās dienās FE intensitāte samazinās un tuvojas neapstarotas kārtiņas FE intensitātei ((4) un (5)). Ceturtajā dienā pēc atkvēlināšanas apstarotas kārtiņas FE intensitāte (6) sakrīt ar neapstarotas kārtiņas FE intensitāti (1) – kārtiņa ir atgriezusies savā pirmsapstarošanas stāvoklī.



3.16. att. Apstaroto kārtiņu FE spektri, kas uzņemti dažādos laikos pēc atkvēlināšanas:
(a) $\text{ZrO}_2:20\%\text{PbS}$ kārtiņa; (b) ZrO_2 kārtiņa

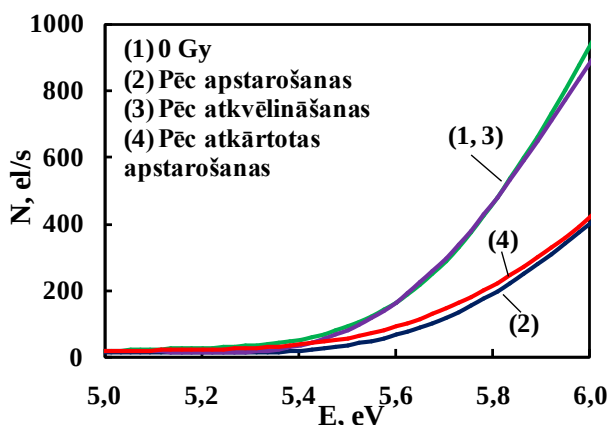
Analizējot FE spektrus 3.16.(a) att., tika secināts, ka $\text{ZrO}_2:20\%\text{PbS}$ kārtiņas atgriešanās pirmsapstarošanas stāvoklī notiek 4 diennakšu laikā pēc atkvēlināšanas, un atkārtoti apstarot $\text{ZrO}_2:20\%\text{PbS}$ kārtiņas ar elektronu starojumu ir iespējams ne ātrāk kā pēc 4 diennaktīm pēc atkvēlināšanas.

Salīdzinājumam, ar elektronu starojuma dozu 10 Gy tika apstarota ZrO_2 kārtiņa un pēc apstarošanas atkvēlināta (3.16.(b) att.). Atkvēlinātās ZrO_2 kārtiņas FE intensitāte sakrita ar neapstarotās kārtiņas FE intensitāti (1) jau nākamajā dienā pēc atkvēlināšanas (3). Turpmākajās dienās FE intensitāte vairs nemainījās ((4) un (5)). Tas pierāda, ka $\text{ZrO}_2:20\%\text{PbS}$ kārtiņu FE intensitātes atgriešanās pirmsapstarošanas stāvoklī 4 diennakšu laikā pēc atkvēlināšanas ir saistīta ar PbS nanodaļiņu klātbūtni.

3.6.3. $\text{ZrO}_2:\text{PbS}$ nanostrukturēto kārtiņu apstarošana ar elektronu starojumu pēc atkvēlināšanas

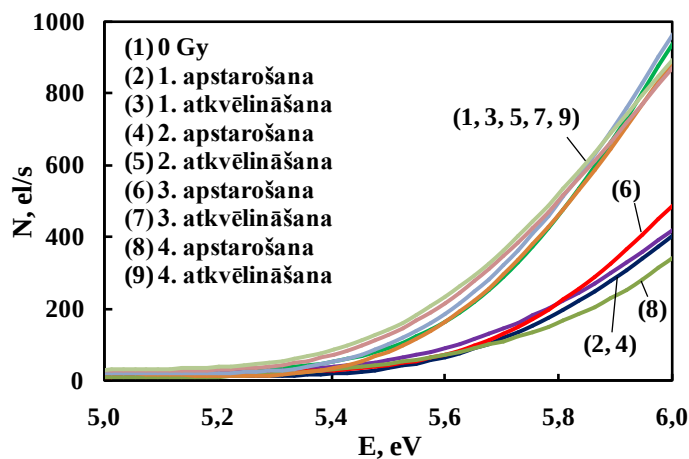
Tika pārbaudīta $\text{ZrO}_2:20\%\text{PbS}$ kārtiņu atkārtotas apstarošanas un pielietošanas iespējamība dozimetrijā pēc atkvēlināšanas. Kārtiņas tika apstarotas ar starojuma dozu 10 Gy, atkvēlinātas, un 4. dienā pēc atkvēlināšanas vēlreiz apstarotas ar dozu 10 Gy (3.18. att.).

Pēc pirmās apstarošanas FE intensitāte samazinās (2), salīdzinot ar neapstarotās kārtiņas FE spektru (1). Pēc atkvēlināšanas FE spektrs tika reģistrēts 4. dienā (3), un konstatēts, ka FE intensitāte sakrita ar pirmsapstarošanas intensitāti (1). Pēc atkārtotas apstarošanas ar dozu 10 Gy FE atkal samazinās (4) un sakrīt ar FE intensitātei, reģistrēto pēc pirmās apstarošanas (2).



3.18. att. Atkārtotas apstarošanas ietekme uz atkvēlinātās $\text{ZrO}_2:20\%\text{PbS}$ kārtiņas FE spektriem

Lai noskaidrotu vai FE intensitātes atjaunošanas efekts saglabājas pēc vairākiem apstarošanas un atkvēlināšanas cikliem, $\text{ZrO}_2:20\%\text{PbS}$ kārtiņa tika vairākas reizes apstarota ar starojuma dozu 10 Gy, katru reizi pirms nākamās apstarošanas veicot kārtiņas atkvēlināšanu. FE spektri tika mērīti pēc katras apstarošanas un atkvēlināšanas (3.19. att.). Kā redzams, FE intensitātes atjaunošanas efekts saglabājas.



3.19. att. $\text{ZrO}_2:20\%\text{PbS}$ kārtiņas FE intensitātes atjaunošanās pēc vairākiem apstarošanas un atkvēlināšanas cikliem

FE intensitātes atjaunošanās pēc vairākiem apstarošanas un atkvēlināšanas cikliem parāda, ka no $\text{ZrO}_2:20\%\text{PbS}$ kārtiņas veidoto nanodozimetru ir iespējams vairākkārtēji atjaunot pirmsapstarošanas stāvoklī.

SECINĀJUMI

1) Nanodozimetrija ir iespējama, ja kā nanodozimetra aktīvo elementu izmantot pusvadītāja nanodaļiņas ar augstu jonizējošā starojuma absorbcijas koeficientu un diametru, samērojamu ar DNS molekulas diametru (daži nanometri). Nanodaļiņām jābūt ieslēgtām dielektriskajā matricā, kas nodrošina nanodaļiņu fizikālo un ķīmisko stabilitāti. Nanodaļiņas kopā ar dielektrisko matricu veido nanostrukturētas kārtiņas.

2) Pirmo reizi tika demonstrēts, ka ZrO_2 kārtiņas ar tajās ieslēgtām PbS nanodaļiņām ($\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētas kārtiņas), ir iespējams izmantot jonizējošā starojuma nanodozimetrījā, dozas nolasīšanai izmantojot fotoemisijas mērījumus no PbS nanodaļiņām.

3) PbS nanodaļiņas veido fotoemisijas aktīvus centrus $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētā kārtiņā. Lai ierosinātu fotoemisiju no PbS nanodaļiņu veidotajiem aktīvajiem centriem, jāizmanto fotoni ar enerģiju 4,9–5,5 eV. Aktīvo centru koncentrācija samazinās jonizējošā starojuma iedarbībā.

4) Tika izstrādāta uz $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētu kārtiņu fotoelektronu emisiju balstīta jonizējošā starojuma dozimetrijas metode, kas ļauj mērīt nanoobjektā absorbēto jonizējošā starojuma dozu. Tika izveidota tarēšanas līkne $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētās kārtiņās absorbētās 9 MeV elektronu starojuma dozas mērīšanai dozu diapazonā 0–10 Gy. Absorbētās dozas mērīšanas kļūda samazinās no 65% līdz 11%, palielinot dozu no 2 Gy līdz 5 Gy un nepārsniedz 11% diapazonā 5–10 Gy.

5) Tika izstrādāta apstaroto $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētu kārtiņu atkvēlināšanas metode, kas paredzēta, lai dzēstu kārtiņās absorbēto starojuma dozu. Parādīts, ka kārtiņu atkvēlināšana vakuumā, 30 minūtes, 150 °C temperatūrā izdzēš kārtiņās absorbēto jonizējošā starojuma dozu un atjauno kārtiņu fotoelektronu emisiju pirmsapstarošanas stāvoklī. $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ kārtiņu atgriešanās pirmsapstarošanas stāvoklī notiek 4 diennakšu laikā pēc atkvēlināšanas, tāpēc atkārtoti apstarot kārtiņas ar jonizējošo starojumu ir iespējams ne ātrāk kā pēc 4 diennaktīm pēc atkvēlināšanas. Fotoemisijas atjaunošanas efekts saglabājas pēc vairākiem apstarošanas-atkvēlināšanas cikliem.

REKOMENDĀCIJAS

Lai attīstītu $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētu kārtiņu un fotoemisijas metodes pielietošanu nanodozimetrījā, turpmākajos pētījumos ir ieteicams:

1) Pilnveidot absorbētās dozas nolasīšanas metodiku, lai samazinātu dozas nolasīšanas kļūdu līdz 1%, sevišķi ja doza ir mazāka par 2 Gy.

2) Veikt uz $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētām kārtiņām balstīta nanodozimetra metroloģiskās pārbaudes, lai novērtētu ārējo apstākļu (gaisa mitrums, temperatūra) ietekmi uz absorbētās dozas ilgstošu saglabāšanos nanodozimetrā.

3) Veikt $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētu kārtiņu apstarošanu ar dažādiem jonizējošā starojuma veidiem, enerģijām un dozām, lai novērtētu $\text{ZrO}_2\text{:PbS}$ nanostrukturētu kārtiņu izmantošanas diapazonu / iespējas.

4) Veikt nanodozimetra kalibrēšanu, pamatojoties uz starojuma izraisītām izmaiņām DNS molekulā.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Akmene R.J., Balodis A.J., Dekhtyar Yu. D. , Markelova G.N., Matvejevs J.V., Rozenfelds L.B., Sagalovich G.L., Smirnovs J.S., Tolkachovs A.A., Upmiņš A.I. Exoelectron emission specrometre complete set of surface local investigation// *Surface: Physics, Chemistry, Mechanics*. - 1993. - Vol.8. - pp.125-128.
2. Alivisatos A.P. *Semiconductor Clusters, Nanocrystals, and Quantum Dots*// *Science, New Series*. - 1996. - Vol.271. - pp.933-937.
3. Apinis, A. *Fizika*. - Rīga: Zvaigzne, 1972. - 707.lpp.
4. Arhipova I., Bāliņa S. *Statistika ekonomikā. Risinājumi ar SPSS un Microsoft Excel*. - Rīga: Datorzinību centrs, 2003. - 352 lpp.
5. Bantsar A., Pietrzak M., Jaskóla M., Korman A., Pszona S., Szepliński Z. *Status report: Nanodosimetry of carbon ion beam at HIL*// *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*. - 2014. - Vol.19. - pp.S42-S46.
6. Baskar R., Lee KA, Yeo R, Yeoh KW. *Cancer and Radiation Therapy: Current Advances and Future Directions*// *International Journal on Medical Sciences*. - 2012. - Vol.9. - pp.193-199.
7. Beddar A.S, Krishnan S. *Intraoperative radiotherapy using a mobile electron LINAC: A retroperitoneal sarcoma case*// *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. - 2005. - Vol.6. - pp.95-107.
8. Beecroft L.L., Ober C.K. *Advanced Nanocomposite Materials for Optical Applications*// *Chemistry of Materials*. - 1997. - Vol.9. - pp.1302-1317.
9. Berkner L.V., Marshall L.C. *On the Origin and Rise of Oxygen Concentration in the Earth's Atmosphere*// *Journal of the Atmospheric Sciences*. - 1965. - Vol.22. - pp.225-261.
10. Carlson T.A. *Photoelectron and Auger Spectroscopy*. - New York: Plenum Press, 1975. - 417 p.
11. Clinac 2100C/D Varian, Tehniskie raksturojumi/ *Internets*.- <http://ru.medwow.com/med/linear-accelerator/varian/clinac-2100cd/35317.model-spec> [skatīts 11.01.2015]
12. Conte V., De Nardo L., Colautti P., Ferretti A., Grosswendt B., Lombardi M., Poggi M., Canella S., Moro D., Tornielli G. *First track-structure measurements of 20 MeV protons with the STARTRACK apparatus*// *Radiation Measurements*. - 2010. - Vol.45. - pp.1213-1216.
13. Conte V., Grosswendt B., Colautti P., Moro D., De Nardo L. *Track-structure investigations: A supplement to microdosimetry*// *AIP Conference Proceedings*. - 2013. - Vol.1530. - pp.140-147.
14. Dehtjars J., Emziņš Dz., Jurkevičs A., Milano F. *un citi. Radiācijas drošība radiologu asistentiem*.- Rīga: RTU, 2006. – 336 lpp.
15. Dekhtyar Yu. *Emission of weak elections: Dosimetry of nanovolumes*// *Radiation Measurements*. - 2013. - Vol.55. - pp.34-37.
16. Emeline A., Kataeva G.V., Litke A.S., Rudakova A.V., Ryabchuk V.K., Serpone N. *Spectroscopic and Photoluminescence Studies of a Wide Band Gap Insulating Material: Powdered and Colloidal ZrO2 Sols*// *Langmuir*. - 1998. - Vol.14. - pp.5011-5022.
17. Fuks E., Horowitz Y.S., Horowitz A., Oster L., Marino S., Rainer M., Rosenfeld A., Datz H. *Thermoluminescence solid-state nanodosimetry-the peak 5a/5 doseimeter*// *Radiation Protection Dosimetry*. - 2011. - Vol.143. - pp.416-426.
18. Furetta C. *Handbook of Thermoluminiscence*. - Singapore: World Scientific Publishing Co., 2003. - 446 p.
19. Garty G., Shchemelinina S., Breskina A., Chechika R., Assaf G., Orio I., Bashkirov V., Schulte R., Grosswendt B. *The performance of a novel ion-counting nanodosimeter*// *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. - 2002. - Vol.492. - pp.212-235.
20. Gatan Inc. *Precision Etching Coating System, Model 682* / *Internets*. - [http://www.glteam.com/pdf/682PECS\(New\).pdf](http://www.glteam.com/pdf/682PECS(New).pdf) [skatīts 16.05.2015]
21. Grosswendt B. *Recent Advances of Nanodosimetry*// *Radiation Protection Dosimetry*. - 2004. - Vol.110. - pp.789-799.
22. Hall E.J., Giaccia A.J. *Radiobiology For The Radiologist*. - Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2006. - 586 p.
23. HeatWave Labs *Model 101303-23 Temperature Controller, User's Manual* / *Internets*. - <http://www.cathode.com/pdf/HW101303-23Manual.pdf> [skatīts 11.01.2015]
24. Hitachi S-4800 *Field Emission Scanning Electron Microscope* / *Internets*. - http://cmrf.research.uiowa.edu/files/cmrf.research.uiowa.edu/files/S-4800%20Instruction%20Manual_1.pdf [skatīts 16.05.2015]
25. Hyun B.-R., Zhong Y.-W., Bartnik A.C., Sun L., Abruña H.D., Wise F.W., Goodreau J.D., Matthews J.R., Leslie T.M., Borrelli N.F. *Electron Injection from Colloidal PbS Quantum Dots into Titanium Dioxide Nanoparticles*// *ACS Nano*. - 2008. - Vol.2. - pp.2206-2212.
26. Ibach H. *Electron Spectroscopy for Surface Analysis*.- New York, SpringerVerlag, 1977. – 315.p
27. ICRU Report 85: *Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation*// *Journal of the ICRU*. - 2011. - Vol.11. - pp.1-31.

28. Jordan L. Review of recent advances in non 3D dosimeters// *Journal of Physics: Conference Series*. - 2013. - Vol.444. - Article number 012009. - pp.1-8.
29. Konstantatos G., Sargent E.H. Nanostructured materials for photon detection// *Nature Nanotechnology*. - 2010. - Vol.5. - pp.391-400.
30. L8222 Radiant Spectrum Comparison / Internets. - <http://www.datasheetarchive.com/dl/Datasheet-028/DSA00487525.pdf> [skatīts 11.01.2015]
31. Low D.A., Moran J.M., Dempsey J.F., Dong L., Oldham M. Dosimetry tools and techniques for IMRT// *Medical Physics*. - 2011. - Vol.38. - pp.1313-1338.
32. Ministru kabineta noteikumi Nr.149 no 09.04.2002. Noteikumi par aizsārdzību pret jonizējošo starojumu / Internets. - <http://likumi.lv/doc.php?id=61173> [skatīts 27.12.2014]
33. Motic BA400 / Internets. - <http://www.meyerinst.com/html/motic/microscopes/B%20Series/BA400.pdf> [skatīts 11.01.2015]
34. Nettelbeck H., Rabus H. Nanodosimetry: The missing link between radiobiology and radiation physics?// *Radiation Measurements*. - 2011. - Vol.46. - pp.893-897.
35. Nieto J.A. Thermoluminescence Dosimetry (TLD) and its Application in Medical Physics// *AIP conference Proceedings*. - 2004. - Vol.724. - pp.20-27.
36. OECD, European Union. Health at a Glance: Europe 2014/ Internets. - http://ec.europa.eu/health/reports/european/health_glance_2014_en.htm [skatīts 03.01.2015]
37. PCI Bus Compatible Counting Board M8784 / Internets. - <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/hamamatsu/M8784.pdf> [skatīts 11.01.2015]
38. Photon and Electron Interactions With Matter / Internets. - <http://pdg.lbl.gov/1998/photonelecrpp.pdf> [skatīts 18.01.2015]
39. Rabus H., Nettelbeck H. Nanodosimetry: Bridging the gap to radiation biophysics// *Radiation Measurements*. - 2011. - Vol.46. - pp.1522-1528.
40. Reisfeld R. Nanosized semiconductor particles in glasses prepared by the sol-gel method: their optical properties and potential uses// *Journal of Alloys and Compounds*. - 2002. - Vol.341. - pp.56-61.
41. Robertson J. Band offsets of wide-band-gap oxides and implications for future electronic devices// *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. - 2000. - Vol.18. - pp.1785-1791.
42. Saraidarov T., Reisfeld R., Sashchiuk A., Lifshitz E. NanoCrystallites of Lead Sulfide in Hybrid Films Prepared by Sol-Gel Process// *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. - 2005. - Vol.34. - pp.137-145.
43. Sashchiuk A., Lifshitz E., Reisfeld R., Saraidarov T. Properties of PbS nanocrystals embedded in zirconia sol-gel films// *Materials Science and Engineering C*. - 2002. - Vol.19. - pp.67-71
44. Sashchiuk A., Lifshitz E., Reisfeld R., Saraidarov T., Zelner M. Optical and Conductivity Properties of PbS Nanocrystals in Amorphous Zirconia Sol-Gel Films// *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. - 2002. - Vol.24. - pp.31-38.
45. Seah M.P., Dench W.A. Quantitative electron spectroscopy of surfaces: A standard data base for electron inelastic mean free paths in solids// *Surface and Interface Analysis*. - 1979. - Vol.1. - pp.2-11.
46. Slimību profilakses un kontroles centrs: Veselības aprūpes statistika, Statistikas dati par 2013. gadu, Onkoloģija/ Internets. - <http://www.spkc.gov.lv/veselibas-aprupes-statistika/> [skatīts 18.05.2015]
47. Slimību profilakses un kontroles centrs: Veselības aprūpes statistika, Statistikas dati par 2014. gadu, Mirstība/ Internets. - <http://www.spkc.gov.lv/veselibas-aprupes-statistika/> [skatīts 18.05.2015]
48. Sors A., Cassol E., Latorzeff I., Duthil P., Sabatier J., Lotterie J.A., Redon A., Berry I., Franceries X. An optimized calibration method for surface measurements with MOSFETs in shaped-beam radiosurgery// *Physica Medica*. - 2014. - Vol.30. - pp.10-17.
49. Souris J.S., Cheng S.-H., Pelizzari C., Chen N.-T., La Riviere P., Chen C.-T., Lo L.-W. Radioluminescence characterization of in situ x-ray nanodosimeters: Potential real-time monitors and modulators of external beam radiation therapy// *Applied Physics Letters*. - 2014. - Vol.105. - Article number 203110. - pp.1-5.
50. Spectroscopy. Photonics Handbook / Internets. - <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25118> [skatīts 18.01.2015]
51. Spot light source LC8 LIGHTNINGCURE L8222 / Internets. - http://www.helmut-singer.de/pdf/hamamatsulc5_lc6.pdf [skatīts 11.01.2015]
52. Standard Imaging, Inc. Micro Ion Chambers / Internets. - <http://www.standardimaging.com/exradin/micro-ion-chambers/> [skatīts 01.01.2015]
53. The Geant4-DNA Project / Internets. - <http://geant4-dna.org/> [skatīts 08.01.2015]
54. Ultraskaņas vanna „Bandelin Sonorex RK31”: Data Sheet / Internets. - http://bandelin.com/datenblaetter/RK/RK_31_H_BANDELIN.pdf [skatīts 11.01.2015]
55. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. - Москва: Наука, 1966. - 542 с
56. Лампа спектральная ДДС 30 (ЛД2-Д) / Internets. - http://www.medrk.ru/shop/index.php?id_group=71&id_subgroup=71&id_goods=10060 [skatīts 11.01.2015]

57. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. - Киев: Наукова думка, 1981. - 339 с
58. Энциклопедия физики и техники: Фотоэлектронная эмиссия / Internets. - http://www.femto.com.ua/articles/part_2/4392.html [skatīts 22.01.2015]

PATEICĪBAS

Vēlos pateikties promocijas darba vadītājam prof. Jurijam Dehtjaram par vadību, konsultācijām, palīdzību rezultātu analīzē, novēroto fizikālo efektu būtības izskaidrošanu.

Paldies prof. Renatai Rejsfeld un pētniecei Tsilai Saraidarov no Jeruzalemes Ebreju Universitātes (Hebrew University of Jerusalem) par pētāmo paraugu izgatavošanu.

Paldies medicīnas fiziķei Indrai Surkovai par pētāmo paraugu apstarošanu ar jonizējošo starojumu.

Pateicos laborantam Danielam Jevdokimovam par SEM mērījumu veikšanu.

Izsaku pateicību maniem kolēģiem no Biomedicīnas inženierzinātņu un nanotehnoloģiju institūta. Īpašs paldies Viktorijai Vendiņai un Maksimam Šneideram par darba rediģēšanu un kritiskām piezīmēm, prof. Aleksejam Kataševam par konsultācijām mērījumu apstrādē, Vinetai Zemītei par motivēšanu.

Liels paldies maniem studentiem Aļisai Rešetņikovai un Pāvelam Kovaļovam par eksperimentālo datu ieguvu un entuziasmu.

Paldies RTU P-16 Promocijas padomes sekretārei Natālijai Mozgai par konsultācijām darba noformēšanas un nodošanas jautājumos.

Paldies RTU Doktorantūras daļai.

Sirsnīgs paldies manai ģimenei par atbalstu un motivēšanu.