



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**

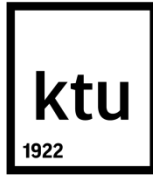
Paulius Ruželė

„RIALTO TLD“ įrenginio funkcionalizavimas nestandartinių
dozimetų nuskaitymui plačiame dozių intervale

Magistro projektas

**Vadovas
Prof. dr. D. Adlienė**

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

„RIALTO TLD“ įrenginio funkcionalizavimas nestandartinių
dozimetų nuskaitymui plačiame dozių intervale

Magistro baigiamasis projektas
Studijų programa: 621B92002 Medicinos fizika

Vadovas

Prof. dr. D. Adlienė
2016-06-06

Recenzentas

Doc. dr. Leonas Jakevičius
2016-06-06

Projektą atliko

Paulius Ruželė
2016-06-06

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

(Fakultetas)

(Studento vardas, pavardė)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „RIALTO TLD“ įrenginio funkcionalizavimas nestandartinių dozimetų nuskaitymui plačiame dozių intervale“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Pauliaus Ruželės** baigiamasis projektas tema „RIALTO TLD“ įrenginio funkcionalizavimas nestandartinių dozimetų nuskaitymui plačiame dozių intervale“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Ruželė, Paulius. „RIALTO TLD“ įrenginio funkcionalizavimas nestandartinių dozimetru nuskaitymui plačiame dozių intervale. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Diana Adlienė; Kauno technologijos universitetas, Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Medicina ir sveikata, Biomedicinos mokslai

Reikšmingi žodžiai: Termoluminescenciniai dozimetrai, TLD nuskaitymas, dozės, pacientų dozimetrija.

Kaunas, 2016, 59 p.

SANTRAUKA

Pacientų dozės yra vertinamos naudojant informaciją, sukauptą termoluminescenciniuose dozimetruose apšvitos metu. Sukaupta informacija yra nuskaityta specialiuose dozimetru skaitytuvuose, kurie pasižymi matavimo tikslumu, nuskaitytos informacijos patikimumu, galimai mažomis aparatūrinėmis neapibrėžtimis. Būtina sąlyga šiuolaikiniams įrenginiams – kompiuterizuotas skaitmeninės informacijos pateikimas, užtikrinantis nuskaitymo proceso spartą ir duomenų analizės įvairiais pjūviais galimybę.

Šiuo darbu buvo siekiama funkcionalizuoti senos kartos TLD nuskaitymo įrenginį „RIALTO TLD“ ir praplėsti jo funkcijas, integruojant į jį suprojektuotą ir sukonstruotą atminties modulį, leidžiantį greičiau bei tiksliau atlikti matavimus. Atminties modulyje yra numatyta kompiuterinė sąsaja, užtikrinanti skaitmeninės informacijos pateikimą vartotojui. Atminties modulio valdymas yra realizuotas naudojant specialiai šiam tikslui parašytą algoritmą. Įdiegus naująjį (4 GB) atminties modulį, padidėjo duomenų įrašymo sparta, sumažėjo nuskaitymo įrenginio akustiniai bei elektriniai triukšmai, kas leido padidinti skaitytuvo jautrumą bei praplėsti nuskaitytomų dozių intervalą. Programos valdoma atminties modulio kompiuterinė sąsaja suteikia galimybę perkelti duomenis į personalinį kompiuterį tolimesnei duomenų analizei.

Pritaikius „RIALTO TLD“ skaitytuvą ir nestandartinių dozimetru, tokių kaip „pin worms“ [37] nuskaitymui, realizuota galimybė atlikti *in vivo* dozimetrinius matavimus kateterinėje intraudininėje brachiterapijoje.

Ruželė, Paulius. Functionalization of „RIALTO TLD reader“ for reading of non-standart dosimeters in a broad dose range: Master`s thesis in Medical Physics / supervisor prof. dr. Diana Adlienė. The Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Medicine and Health, Biomedical Science

Key word: Thermoluminescent dosimeters (TLD), TLD readers, doses, patients dosimetry

Kaunas, 2016, 59 p.

SUMMARY

Patient doses are assessed using information which is collected in thermoluminescent detectors (TLDs) during patients irradiation procedure. Accumulated information is read in special TLD readers, that are characterized by high measurement precision, reliability of provided results of measurements and possibly low equipment related uncertainties. The most important requirement for modern TLD reader is digital representation of information, which enables fast information read out procedure and ability to analyse obtained results.

Functionalization of the out-dated „RIALTO TLD reader“ was undertaken in this work with the aim to expand its functions and integrating newly developed and constructed memory module (4 GB) which enables fast and precise measurements. Memory module is supported with computer interface, which enables representation of digital information to the user. Controlling of memory module is realized via developed special program algorithm. Integration of the new memory module into RIALTO TLD reader enabled to enhance data recording speed and reduce acoustic and electric noise. Due to up-dating, the higher sensitivity was achieved and the range of read-out doses was expanded. Controlled computer interface enables data transfer to personal computer for the further data analysis.

Adjusting of RIALTO TLD reader for the read- out of non standard dosimeters like „pin worms“ are [37] the possibility to perform *in vivo* dose measurements in catheter based interstitial brachytherapy was realized.

procedure, device functionalization and application of non-standart size dosimeters are made.

TURINYS

| | |
|---|----|
| PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS | 7 |
| LENTELIŲ SĄRAŠAS | 8 |
| Sutrumpinimų sąrašas | 11 |
| ĮVADAS | 12 |
| 1. TERMOLIUMINESCENCINIAI DOZIMETRAI IR JŲ NUSKAITYMO METODAI | 14 |
| 1.1. Termoluminescenciniai dozimetrai | 14 |
| 1.1.1. LiF:Mg, Ti (TLD-100) dozimetrai | 14 |
| 1.1.2. LiF:Mg,Cu,P („pin worm“) dozimetrai | 16 |
| 1.1.3. CaSO ₄ : Dy (TLD-900) dozimetrai | 17 |
| 1.2. TLD nuskaitymo sistemų apžvalga | 19 |
| 1.2.1. Karštu oru kaitinamų TLD nuskaitymo sistema | 19 |
| 1.2.2. Lazeriu kaitinamų termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo sistemos | 20 |
| 1.2.3. Lazeriu kaitinamų TLD dozimetų nuskaitymo sistema (I) | 20 |
| 1.2.4. Lazeriu kaitinamų TLD dozimetų nuskaitymo sistema (II) | 22 |
| 1.2.5. Dujomis kaitinamų termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo sistemos | 23 |
| 1.2.6. Karštu azotu kaitinamų TLD nuskaitymo sistema | 24 |
| 1.3. Aukštos temperatūros santykio metodas | 26 |
| 2. TEORINĖ DALIS | 29 |
| 2.1. Termoluminescencija | 29 |
| 3.1. RIALTO skaitytuvas | 33 |
| 3.2. Dozimetų nuskaitymas | 35 |
| 3.3. Matavimai | 36 |
| 3.4. Kalibravimas | 37 |
| 3.5. Matavimų neapibrėžtys | 38 |
| 4. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS | 39 |
| 4.1. TLD nuskaitymo sistemos RIALTO funkcionalizavimas | 39 |
| 4.2. Įrangos funkcionalumo testavimas nustatant paciento dozes brachiterapijos procedūros metu | 49 |
| IŠVADOS | 56 |
| ŠALTINIAI | 57 |

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

| | | |
|------------------|--|----|
| 1.1. pav. | Tipinė TLD-100 dozimetų iššvyčio kreivė..... | 15 |
| 1.2. pav. | Termoluminescencinio signalo intensyvumo priklausomybė nuo dozės..... | 16 |
| 1.3 pav. | Tipinė MCP dozimetų iššvyčio kreivė..... | 16 |
| 1.4 pav. | LiF: MCP spinduliuojamų bangų ilgių pasiskirstymas..... | 17 |
| 1.5 pav. | Termoluminescencinių CaSO ₄ : Dy dozimetų iššvyčio kreivė..... | 18 |
| 1.6 pav. | TLD sistemos, kurioje TLD kaitinami karštu oru, struktūrinė schema..... | 19 |
| 1.7 pav. | LHTLD nuskaitymo sistemos struktūrinė schema..... | 21 |
| 1.8 pav. | LHTLD nuskaitymo sistemos struktūrinė schema..... | 23 |
| 1.9 pav. | TLD sistemos, kurioje TLD kaitinami karštu azotu, struktūrinė schema..... | 25 |
| 1.10 pav. | Iššvyčio kreivės aukštos temperatūros sritis..... | 27 |
| 1.11 pav. | Dozimetų, apšvitintų skirtinga LET pasižyminčiais laukais, iššvyčio kreivių palyginimas kairėje, dešinėje – sugertosios dozės bei aukštos temperatūros santykio palyginimas..... | 27 |
| 1.12 pav. | Iššvyčio kreivės pokytis kintant dozimetų pozicijai skaitytuve..... | 28 |
| 2.1 pav. | Termoluminescencijos procesas..... | 29 |
| 3.1 pav. | „RIALTO TLD“ skaitytuvo, dozimetų nuskaitymo bloko principinė schema..... | 33 |
| 3.2 pav. | Dozimetų patalpinimo į skaitytuvą schema..... | 34 |
| 3.3 pav. | TLD iššvyčio kreivės pavaizduotos su kaitinimo temperatūros kreive, dozimetrus kaitinant tolygiai (a) ir pakopomis (b)..... | 34 |
| 3.4 Pav. | Dozimetų kalibracijai naudoto ROKUS-M įrenginio struktūrinė schema..... | 37 |
| 3.5 Pav. | Plataus spinduliuotės lauko geometrija..... | 38 |
| 4.1 pav. | Magistralės peradresavimo schema..... | 42 |
| 4.2 pav. | Keitiklio spausdintinė plokštė bei reikiami..... | 43 |
| 4.3 pav. | Surinktas keitiklis su įstatyta atminties kortele..... | 44 |
| 4.4 pav. | Dozimetų laikiklių pritaikymas naujo tipo TLD-100 dozimetų nuskaitymui..... | 45 |
| 4.5 pav. | Pirmos dozimetų grupės kalibracinių koeficientų pasiskirstymas..... | 47 |
| 4.6 pav. | Antros grupės „Pin worm“ dozimetų kalibracinių koeficientų pasiskirstymas..... | 48 |
| 4.7 pav. | Brachiterapijos procedūros modelis..... | 50 |
| 4.8 pav. | Apskaičiuotų ir išmatuotų dozių palyginimas..... | 54 |
| 4.9 pav. | Išmatuotų bei planavimo sistemoje apskaičiuotų dozių palyginimas | 54 |
| 4.10 pav. | Išmatuotų bei planavimo sistemoje apskaičiuotų dozių palyginimas..... | 55 |

LENTELIŲ SĄRAŠAS

| | |
|--|----|
| 1.1 lentelė. Termoluminescencinių dozimetų charakteristikų lyginamoji analizė..... | 18 |
| 1.2 lentelė. TLD nuskaitymo sistemų lyginamoji analizė..... | 25 |
| 3.1 lentelė. “RIALTO TLD“ įrenginio parametrai atliekant dozimetų nuskaitymą..... | 36 |
| 3.2 lentelė. Kalibracinio šaltinio parametrai..... | 38 |
| 4.1 lentelė. Keitiklių sudarančių komponentų sąrašas..... | 43 |
| 4.2 lentelė. Pirmos dozimetų grupės kalibraciniai koeficientai..... | 47 |
| 4.3 lentelė Antros dozimetų grupės kalibraciniai koeficientai..... | 48 |
| 4.4 lentelė. Dozimetų kalibracinių koeficientų vidurkis bei standartinis nuokrypis..... | 49 |
| 4.5 lentelė. Kalibracinio šaltinio parametrai..... | 51 |
| 4.6 lentelė. Brachiterapijos procedūros metu užregistruotų impulsų ir dozių skaičiavimai..... | 52 |
| 4.7 lentelė. Išmatuotos, apskaičiuotos dozės bei santykinė neapibrėžtis..... | 53 |
| 4.8 lentelė. Maksimalus, minimalus bei vidutinis dozės nuokrypis..... | 53 |

Sutrumpinimų sąrašas

TLD – termoluminescencinis dozimetras

TL – termoluminescencija

TATENA – Tarptautinė atominės energijos agentūra

ISA – seniausia jungtis, duomenis perduodanti 16 bitų režimu.

LHTLD – lazeriu kaitinamų termoluminescencinių dozimetų skaitymo sistema

LET – ilginė energijos perdava

TTL – (angl. *transistor-transistor logic*) tranzistorius-tranzistorius logika

NIR – artima infraraudonajai šviesai

HTR – aukštos temperatūros santykis

ATA – (angl. *Advanced Technology Attachment*) atminties įrenginių prijungimo prie kompiuterio standartas

Ds – termoluminescencinio signalo intensyvumo maksimali vertė

ĮVADAS

Pacientų dozės yra vertinamos naudojant informaciją, sukauptą termoluminescenciniuose dozimetruose (TLD) apšvitos metu. Sukaupta informacija yra nuskaitoma specialiuose dozimetrų skaitytuvuose, kurie pasižymi matavimo tikslumu, nuskaitomos informacijos patikimumu, galimai mažomis aparatūrinėmis neapibrėžtimis. Būtina sąlyga šiuolaikiniams įrenginiams – kompiuterizuotas skaitmeninės informacijos pateikimas, užtikrinantis nuskaitymo proceso spartą ir duomenų analizės įvairiais pjūviais galimybę.

Sugertosios dozės matavimams plačiai naudojami įvairūs termoluminescenciniai dozimetrai [1-3, 7, 12, 37]. Dozimetrų savybės priklauso nuo medžiagos iš kurios jie yra pagaminti bei joje esančių priemaišų. Termoluminescenciniai dozimetrai pasižymi mažu dozės silpumu, dideliu jautrumu bei tikslumu. Termoluminescenciniuose dozimetruose medicininės apšvitos procedūrų metu sukaupta dozimetrinė informacija nuskaitoma TLD skaitytuvais, kurių veikimo principas pagrįstas terminiu poveikiu scintiliacinei dozometro medžiagai, kai dėl suteiktos šiluminės energijos, apšvitos metu priemaišinių lygmenų gaudyklėse „nusėdę“ elektronai yra grąžinami į valentinę juostą, o susidaręs energijų skirtumas išspinduliuojamas fotonų pavidalu. Skaitytuvas registruoja išspinduliuotų fotonų intensyvumą, kuris yra proporcingas dozimetre sugertajai dozei.

Pastaraisiais metais buvo pasiūlyta net keletas naujo tipo ir naujos koncepcijos TLD skaitytuvų (informacija nuskaitoma įkaitintų dujų sraute arba vykdant lazerinį kaitinimą) tačiau „auksiniu standartu“ vis dar yra laikomas informacijos nuskaitymas kaitinant ore dozimetrą iki tam tikros temperatūros. Šiai skaitytuvų kategorijai priklauso šiame darbe naudojamas termoluminescencinių dozimetrų nuskaitymo įrenginys RIALTO TLD. Skaitytuvas priskirtinas senosios kartos įrenginiams: jis yra lėtaeigis, nuskaitomai informacijai didelės įtakos turi akustiniai ir elektriniai triukšmai, jame nenumatytas informacijos skaitmenizavimas ir jos perdavimas išorės vartotojams, kas apsunkina duomenų analizę. Įrenginys nepritaikytas nestandartinių dozimetrų, tokių kaip „pin worms“ nuskaitymui.

Šio darbo tikslas yra: Termoluminescencinių dozimetrų nuskaitymo sistemos funkcionalizavimas nestandartinių dozimetrų nuskaitymui plačiame dozių intervale ir jos metrologinis įvertinimas.

Šiam tikslui įgyvendinti keliami tokie uždaviniai:

- Atlikti termoluminescencinių dozimetrų charakteristikų lyginamąją analizę;

- Apžvelgti termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo sistemas;
- Praplėsti „RIALTO TLD“ skaitytuvo funkcijas nestandartinių dozimetų nuskaitymui; plačiame dozių intervale, integruojant sukurtą atminties modulį;
- Sukurti programinę sąsają tarp skaitytuvo ir atminties modulio;
- Atlikti funkcionalizuoto „RIALTO TLD“ skaitytuvo metrologinį įvertinimą.
- Atlikti testinius matavimus nuskaityt „pin worm“ dozimetuose sukauptas dozes brachiterapijos procedūros metu.

1. TERMOLIUMINESCENCINIAI DOZIMETRAI IR JŲ NUSKAITYMO METODAI

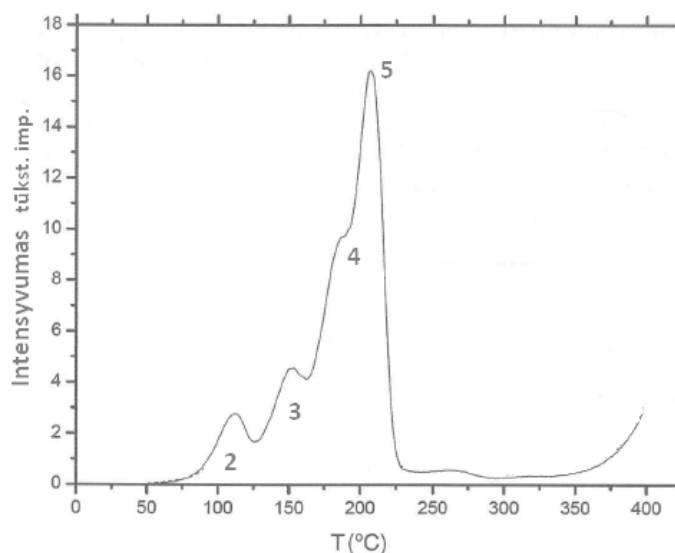
1.1. Termoluminescenciniai dozimetrai

Sugertosios dozės matavimuose plačiausiai naudojami termoluminescenciniai dozimetrai. Praktikoje sutinkami ličio fluorido, kalcio sulfato, kalcio fluorido, berilio oksido ir kiti termoluminescenciniai dozimetrai. Priklausomai nuo dozometro medžiagos bei pridėtų priemaišų, skiriasi jų dozimetrinės savybės (slenkstinė dozė, maksimali detektuojama dozė, tipinė iššvyčio kreivė ir t.t.). Renkantis dozimetrą matavimams, taip pat svarbu atsižvelgti į tai, kokios rūšies bei energijos spinduliuotė bus registruojama. Termoluminescenciniai dozimetrai pasižymi mažu dozės silpumu, dideliu jautrumu ir tikslumu. Dar viena svarbi termoluminescencinių dozimetrų savybė yra ta, kad atlikus nuskaitymą, jie gali būti naudojami pakartotinai [1, 14, 15].

1.1.1. LiF:Mg, Ti (TLD-100) dozimetrai

Dažniausiai personalinėje dozimetrijoje sutinkamas termoluminescencinis dozimetras yra TLD 100. Tai ličio fluorido termoluminescencinis švytalas (LiF:Mg, Ti). TLD-100 sukurtas Harshaw Chemical Company. Luminescencijos centrai TLD-100 dozimetre sukuriama į medžiagą įmaišius apie 180 ppm magnio ir 10 ppm titano priemaišų. Praktikoje šie dozimetrai sutinkami miltelių, strypelių arba kietų granulių pavidalu. TLD-100 pasižymi dideliu jautrumu, atsparumu aplinkos veiksniams ir audinių lygiavertiškumu [16].

TLD-100 iššvyčio kreivėje stebimi penki charakteringieji pikai (1.1. pav.) išsidėstę plačiame temperatūriniame diapazone. Dozimetriniuose matavimuose naudojami ketvirtas ir penktas pikai (stebimi 175-250°C temperatūros ruože), nes šiuose pikuose sukaupta energija, pasižymi ilgiausia pusėjimo trukme, bei yra didžiausio intensyvumo. Pikai esantys žemesnių temperatūrų diapazone matavimams nenaudojami, nes šių pikų energijos išnyksta (angl. fading) kambario temperatūroje kelių dienų bėgyje [16, 17].

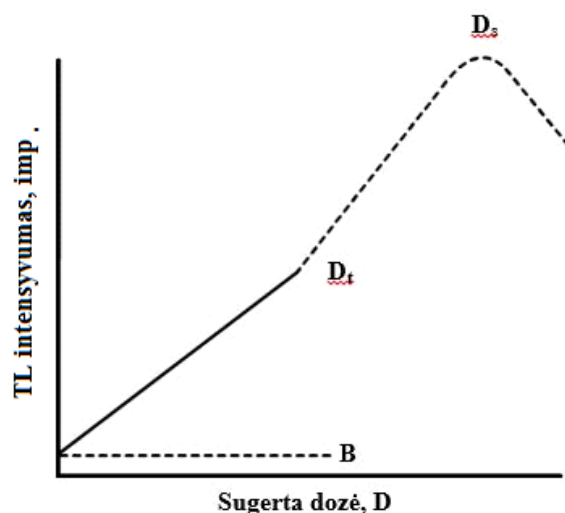


1.1. pav. Tipinė TLD-100 dozimetų iššvyčio kreivė [1]

Gaminamos kelios LiF:Mg, Ti dozimetų atmainos. Šios gamintojo pavadintos MTS, kas reiškia Mg, Ti, sukepintas (angl. *sintered*). Papildomai naudojamas skaičius, parodantis ličio izotopo kiekį. MTS-N – natūralus ličio izotopų kiekis, MTS-6 – prisodrintas šešiais ličio izotopais, MTS-7 – prisodrintas septyniais ličio izotopais [2].

Visi šie dozimetrai gali būti naudojami pakartotinai neribotą kiekį, išlaikydami tokias pat dozimetrines savybes, tokį pat fotonų energijos atsaką, išblukimą ir termoluminescencinį efektyvumą.

TLD-100 dozimetrais galima fiksuoti dozes nuo 10 μ Gy iki 10 Gy. Šiame intervale termoluminescencinio signalo stiprumo priklausomybė nuo dozės yra tiesinė (1.2. pav.). Dozimetų nuskaitymo įrenginiu nuskaičiuos neapšvitintą dozimetą užfiksuotas impulsų skaičius vadinamas foninių triukšmu (paveiksle pažymėta B raide). Šis lygis parodo kokią minimalią dozę gali registruoti dozimetras. Didinant dozę signalo intensyvumas didėja, kol yra pilnai įsotinamas. Signalo intensyvumo maksimali vertė vadinama soties verte D_s . Ją viršijus, signalo intensyvumas pradeda staigia mažėti [17, 31].

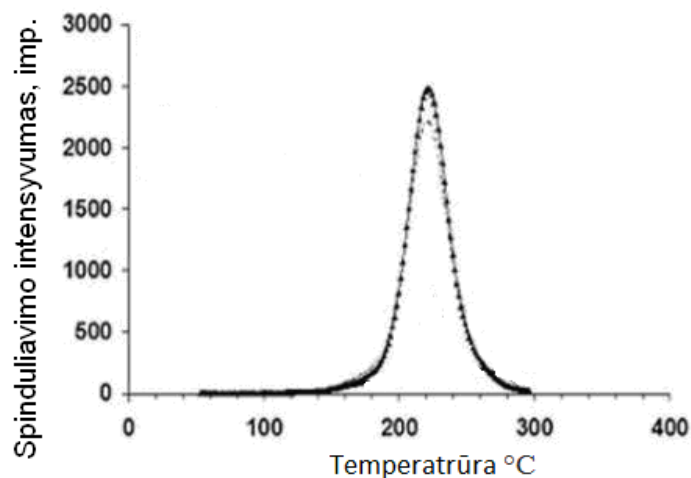


1.2. pav. Termoluminescencinio signalo intensyvumo priklausomybė nuo sugertos dozės [2]

Soties dozė pasiekama, kuomet yra užpildomi visi dozimetrinėje medžiagoje esantys pagavimo centrai. Atliekant praktinius matavimus didžiausia registruojama doze yra laikoma dozė, 20% mažesnė nei soties. Matuojant dozes artimas soties dozei, dozimetra būtina atkairinti keletą sykių, taip atstatant visus pagavimo centrus [1, 19].

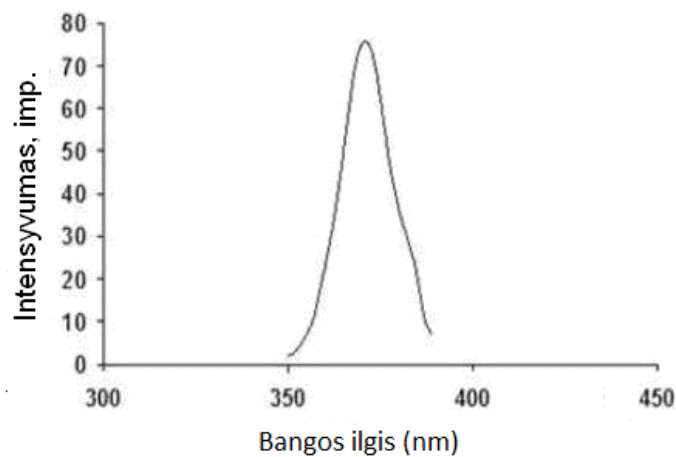
1.1.2. LiF:Mg,Cu,P („pin worm“) dozimetrai

LiF:Mg,Cu,P (angl. *pin worm*) yra didelio jautrumo termoluminescencinis LiF dozimetras, su magnio, vario ir fosforo priemaisomis. Juo galima registruoti jonizuojančios spinduliuotės dozes nuo mikrogrėjų eilės iki soties dozės, kuri yra arti 1kGy [14].



1.3 pav. Tipinė MCP dozimetų iššvyčio kreivė [3]

Termoluminescencinis intensyvumas priklauso nuo dozometro medžiagoje esančių priemaišų kiekio. Maksimalus termoluminescencinis švytėjimas pasiekiamas, kuomet priemaišų koncentracija varijuoja nuo 0,15% iki 0,3% magnio, nuo 0,6% iki 2% fosforo ir nuo 20 ppm iki 500 ppm vario. Iššvyčio kreivės intensyvumo maksimumas stebimas ties 220°C (1. 3 pav.) [3, 18, 20].



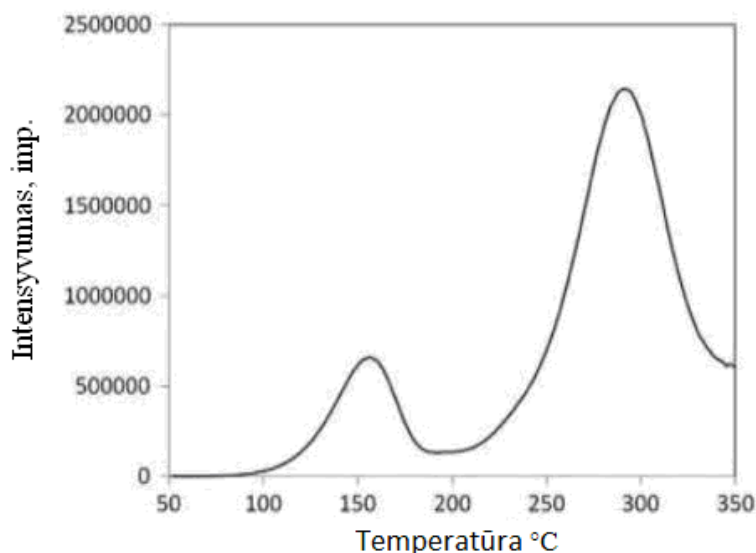
1.4 pav. LiF: MCP spinduliuojamų bangų ilgių pasiskirstymas [3]

MCP tipo dozimetrų emituojamų bangų ilgis, kuomet soties dozė nėra viršijama, yra apie 360 nm (1.4 pav.) [14, 19-21].

1.1.3. CaSO₄ : Dy (TLD-900) dozimetrai

Kalcio sulfatas su disprozio priemaišomis, dėl didelio jautrumo yra puikus termoluminescencinis švytėjas matuoti jonizuojančiąją spinduliuotę, kurios dozės yra nuo 10⁻⁶ Gy iki 100 Gy. Taip pat šis švytėjas pasižymi sąlyginai paprasta gaudyklių struktūra, geru cheminių, temperatūrinių bei fizinių savybių stabilumu. Dėl šių savo savybių jis naudojamas aplinkos radiacijos lygio matavimui bei personaliniam monitoringui [15].

TLD-900 gaminamas nusodinant CaCl₂ tirpalą, praskiestą sieros rūgštimi. Disprozio įvedimui įpilamas DyCl₃ tirpalas. Ca²⁺ : Dy³⁺ atomų santykis tirpale yra 1000:1. Norint panaikinti rūgšties pėdsakus, susidariusios nuosėdos pakartotinai nuplaunamos distiliuotu vandeniu. Išdžiovintos nuosėdos, vieną valandą kaitinamos 975 K temperatūroje. Atkaitintos nuosėdos atvėsinaamos iki kambario temperatūros. Gautas mišinys vadinamas CaSO₄ : Dy-P [15].



1.5 pav. Termoluminescencinių CaSO₄: Dy dozimetų iššvyčio kreivė [4]

TLD-900 nuskaitymo metu gauta iššvyčio kreivė (1.5 pav.) turi du ryškius pikus. Dozių skaičiavimui naudojamas antras pikas, kurio intensyvumo maksimumas yra ties 280°C.

1.1 lentelė. Termoluminescencinių dozimetų charakteristikų lyginamoji analizė [1, 15, 22]

| Dozimetras | TLD-100 | „Pin worm“ | TLD-900 |
|---|----------------|----------------|-----------------|
| Detektuojamų dozių intervalas | 10 μGy – 10 Gy | 10 μGy – 1 kGy | 10 μGy – 100 Gy |
| TL emisijos spektras | 400 nm | 385 nm | 570 nm |
| Termoluminescencinis pikas | 210 °C | 210 °C | 280 °C |
| Reliatyvus jautrumas lyginat su TLD-100 | 1,0 kart. | 40 kart. | 20 kart. |
| Ekvivalentiškumas audiniams | Taip | Taip | Ne |

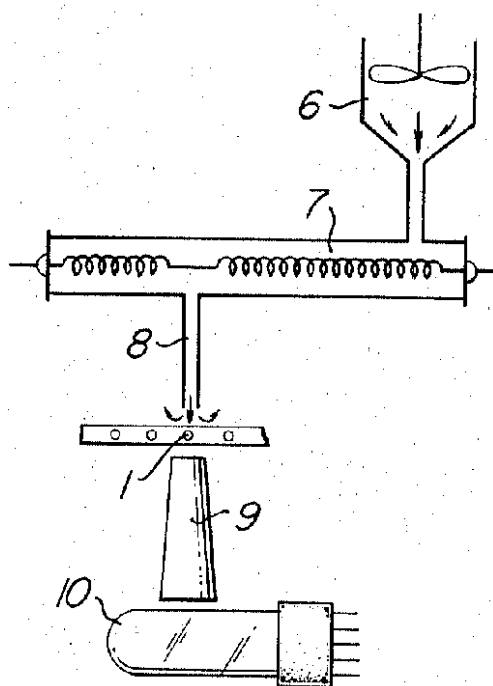
Pateiktoje termoluminescencinių dozimetų lyginamojoje analizėje (1.1 lentelė) matyti, kad jautriausias ir plačiausią detektuojamų dozių intervalą apimantis dozimetras yra TLD-900. Tačiau pagrindinis jo trūkumas tas, jog jis nėra ekvivalentiškas audiniams, todėl jo negalima naudoti personalinėje dozimetrijoje ar medicininiuose matavimuose. Ekvivalentiškumu audiniams pasižymi TLD-100 bei „pin worm“ dozimetrai, tačiau dėl didesnio tikslumo bei platesnio detektuojamų dozių diapazono galima išskirti „pin worm“ dozimetą, kaip patogiausią naudoti tiek personalinėje dozimetrijoje tiek medicininiuose matavimuose.

1.2. TLD nuskaitymo sistemų apžvalga

Termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo sistemos skirstomos į grupes pagal joje naudojamą dozimetų kaitinimo metodą. Dozimetai gali būti kaitinami dujomis (oru, azotu ir pan.), šiluminėmis lempomis, elektrodais arba lazeriu. Kiekvienas iš termoluminescencinių dozimetų kaitinio metodų turi privalumų ir trūkumų.

1.2.1. Karštu oru kaitinamų TLD nuskaitymo sistema

Senesnės kartos termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo sistemoje, dozometro pakaitinimui naudojamas karštas oras (1.6 pav.).



1.6 pav. TLD nuskaitymo sistemos, kurioje TLD kaitinami karštu oru, struktūrinė schema. 6 – ventiliatorius, 7 – kaitinimo spiralė, 8 – tūta, 9 kreiptuvas, 10 – fotodaugintuvas [23]

Termoluminescenciniai dozimetrai patalpinami kaitinimo pozicijose (1). Oro siurblys arba ventiliatorius pažymėtas numeriu 6, o oro kaitinimo spiralė pažymėta numeriu 7. Ventiliatoriumi oras pučiamas į kaitinimo elementą, iš kurio pro tūtą (8) karštas oras patenka ant dozometro (1) paviršiaus. Tokiu būdu dozimetras yra įkaitinamas. Įkaitusi termoluminescencinė medžiaga išspinduliuoja šviesos fotonus, kurie pro vamzdį (9) patenka į fotodaugintuvą (10). Fotodaugintuve šviesos impulsas yra sustiprinamas ir paverčiamas į elektrinį signalą. Signalas valdymo bloke yra apdorojamas ir kompiuterinėmis programomis

pagal jo intensyvumą nubraižoma iššvyčio kreivė bei apskaičiuojama dozometro absorbuota dozė [23].

Pagrindiniai šios matavimo sistemos trūkumai yra ore esančio deguonies sukeliamas chemiliuminescencijos reiškinys ir nepakankamas oro temperatūros matavimas bei valdymas.

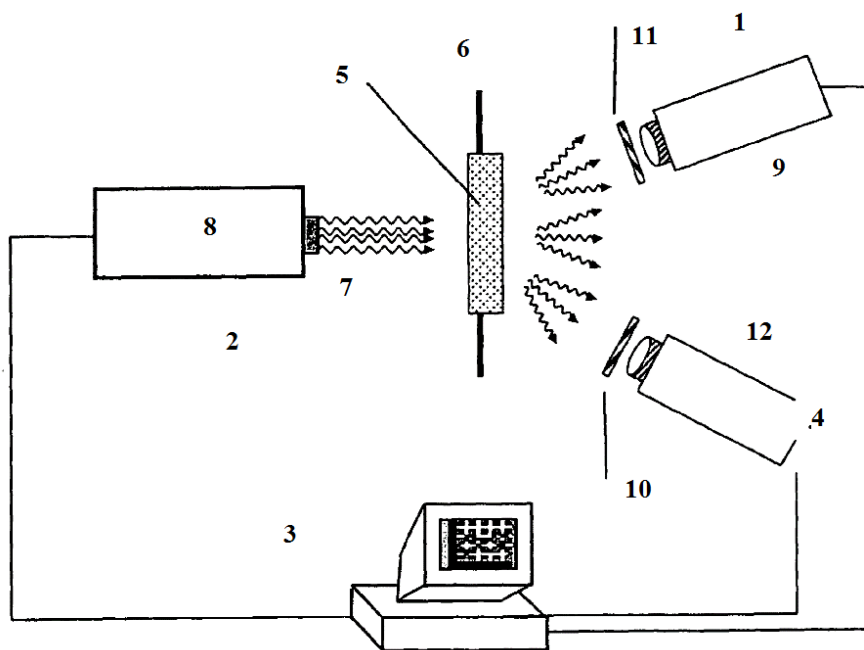
1.2.2. Lazerių kaitinamų termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo sistemos

Lazerių kaitinamų termoluminescencinių dozimetų (angl. *Laser Heated TLD*) nuskaitymo sistemos užtikrina precizišką TLD elemento kaitinimo procedūros kontrolę. Tai užtikrinama realiu laiku matuojant kaitinimo temperatūrą ir koreguojant kaitinimo procesą, priklausomai nuo išmatuotos temperatūros vertės.

Matavimo metu termoluminescencinis dozimetras lazeriu kaitinamas iki nustatytos temperatūros (priklausomai nuo dozometro tipo). Įkaitintas dozimetras skleidžia liuminescencinę šviesą, kurios intensyvumas priklauso nuo dozometro sugertos jonizuojančios spinduliuotės dozės.

1.2.3. Lazerių kaitinamų TLD dozimetų nuskaitymo sistema (I)

LHTLD matavimo sistemą (1.7 pav.) galima suskirstyti į keturis blokus. Termoluminescencinio dozometro kaitinimas reguliuojamas realiu laiku, tam naudojama infraraudonųjų spindulių radiometrija. Radiometrijos blokas duomenis perduoda į valdymo bloką, kuriame jie yra apdorojami ir reikalui esant, gali būti siunčiamos komandos į kaitinimo bloką, siekiant pakoreguoti kaitinimo procesą. Dozometro kaitinimo ir temperatūros matavimo metu nėra jokio fizinio kontakto tarp matavimo ar kaitinimo įtaiso ir pačio dozometro. Matavimo blokas atlieka liuminescencijos matavimus. Užfiksuoti duomenys naudojami iššvyčio kreivių brėžimui, bei dozometro sugertosios dozės skaičiavimui [5].



1.7 pav. LHTLD nuskaitymo sistemos struktūrinė schema. 1 – radiometrijos blokas, 2 – kaitinimo blokas, 3 – valdymo blokas, 4 – matavimo blokas, 5 – TLD elementas, 7 – lazerio spindulys, 8 – lazeris, 9 – IR termometras, 10 – filtras, 11 – filtras, 12 – fotodaugintuvas [5]

Matavimo metu į sistemą patalpinamas TLD elementas (5), kuriame sukaupia jonizuojančios spinduliuotės energija. Mechaninis dozometro laikiklis pažymėtas numeriu 6. Kaitinimo bloku 2 vadinamas lazeris (8). Numeriu 7 pažymėtas lazerio spindulys. Šioje matavimo sistemoje dozometro temperatūra nustatoma matuojant įkaitusio kūno skleidžiamus infraraudonuosius spindulius. Infraraudonųjų spindulių termometras (9) bei filtras (11) sudaro radiometrijos bloką, žymimą skaičiumi 1. Matavimo blokas (4) matuoja įkaitinto termoluminescencinio dozometro skleidžiamą regimą šviesą, NIR (artimus infraraudonajai šviesai) ar ultravioletinius spindulius. Paskutinis – valdymo blokas (3). Šiame bloke valdomas ir koordinuojamas visų blokų darbas, taip pat atliekamas užregistruotų duomenų apdorojimas. Vaizduojama iššvyčio kreivė (emituotų spindulių intensyvumo priklausomybė nuo kaitinimo temperatūros) bei apskaičiuojamos sugertosios dozės [5].

Termoluminescencinių elementų kaitinimui gali būti naudojami įvairūs lazeriai (impulsiniai ar nuolatinės veikos dujiniai lazeriai, kieto kūno ar puslaidininkiniai lazeriai). Vienoje iš matavimo sistemos modifikacijų naudojamas CO₂ lazeris, kurio spindulių bangos ilgis yra 10,6 μm. Šio tipo lazeriu galima kaitinti daugumą termoluminescencinių dozimetų (įskaitant tuos, kurie nusodinti ant nepermatomo substrato arba yra padengti nepermatomomis medžiagomis) [5].

Tarp termoluminescencinio elemento bei matavimo sistemos, kuria matuojama dozometro elemento temperatūra, patalpinamas filtras. Šis filtras praleidžia infraraudonuosius spindulius, tačiau nepraleidžia ultravioletinės šviesos, NIR ir regimos šviesos. Matavimo bloke tarp fotodaugintuvo (12) ir kaitinamo termoluminescencinio elemento patalpinamas filtras (10). Šis optinis filtras praleidžia regimą, artimą infraraudoniesiems spinduliams, bei ultravioletinę šviesą, tačiau nepraleidžia infraraudonųjų spindulių. Filtrų padėtis gali būti keičiama priklausomai nuo aplinkybių bei galimybių, tačiau neturi būti pakenkta pagrindinei jų funkcijai – sulaikyti ir praleisti skirtingų tipų spinduliuotes (priklausomai nuo to, kuriame bloke jis naudojamas) [5].

Valdymo bloku vadinamas kompiuteris, kuriame įdiegtos specialios programos, leidžiančios valdyti visų blokų darbą. Taip pat įdiegiamos programos skirtos apdoroti užregistruotus duomenis [5].

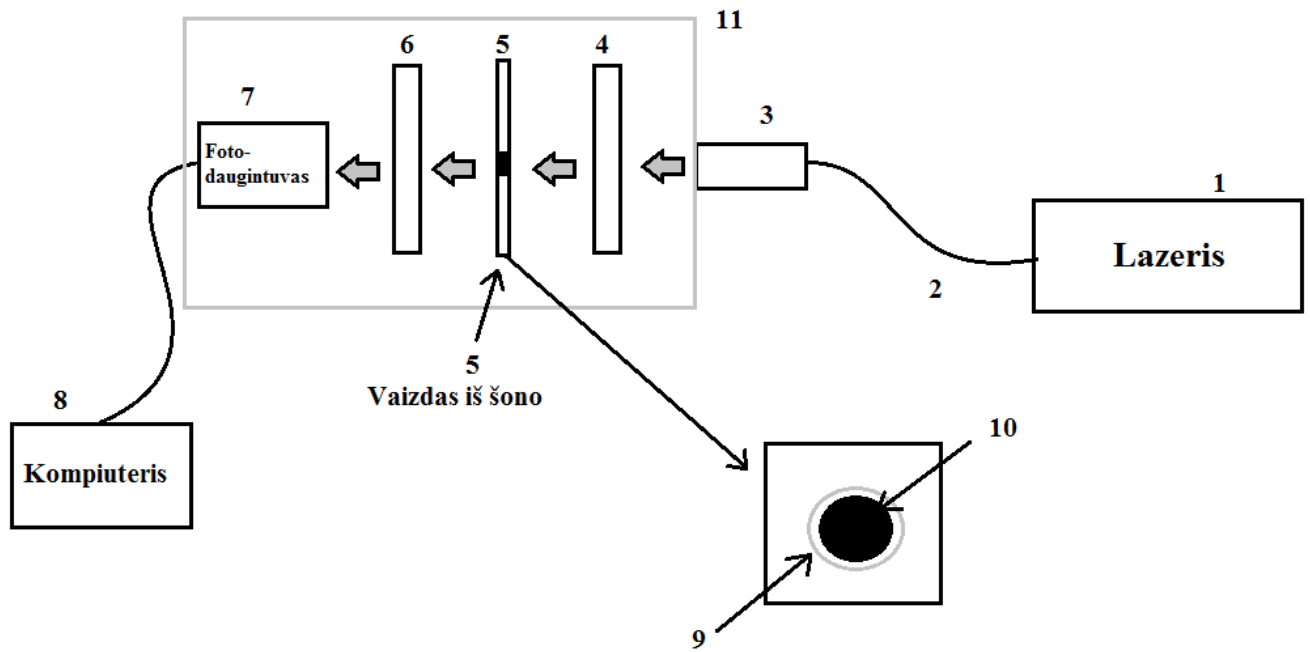
1.2.4. Lazeriu kaitinamų TLD dozimetų nuskaitymo sistema (II)

Šią LHTLD sistemą sudaro lazeris, skaitytuvas ir duomenų apdorojimo blokas. Skaitytuvą sudaro šviesos šaltinis, kuriuo kaitinami dozimetrai, filtravimo sistema ir šviesos intensyvumo registravimo sistema, fiksuojanti termoluminescencinių dozimetų emituotos šviesos intensyvumą. Užregistruotas šviesos srautas paverčiamas elektriniu signalu, kuris vėliau paverčiamas dvejetainine seka, kad duomenys galėtų būti apdoroti kompiuterinėmis programomis.

LHTLD skaitytuvas (1.8 pav.) sudarytas iš šviesos nepraleidžiančios kameros (11), kurioje sumontuoti vienas arba daugiau optinių filtrų (4 ir 6). Šie filtrai naudojami nepageidaujamo bangos ilgio šviesai nufiltruoti. Pro filtras praėję šviesos fotonai pasiekia fotodaugintuvą (7) ir priklausomai nuo šių fotonų kiekio, generuojamas atitinkamo intensyvumo signalas [6].

Šviesos šaltiniui tokiose sistemose dažniausiai naudojamas kieto kūno diodinis lazeris (1). Idealiu atveju lazeris emituoja šviesą, kurios bangos ilgis yra apie 800nm. Šviesa optiniu kabeliu (2), pro lęšį (3) patenka į šviesos nepraleidžiančią kamerą. Joje šviesa praeina pro raudono stiklo filtrą (4), kuriuo pašalinamos trumpesnių bangos ilgių bangos. Lazerio šviesa kaitina apvilktą termoluminescencinį dozimetą, taip iš jo išlaisvindama elektronus. Šie elektronai rekombinuoja su dozometro medžiagos jonais taip juos sužadindami. Dalis sužadintų jonų grįžta į ramybės būseną, taip išspinduliuodami šviesos fotoną. Šis procesas vadinamas lazeriu pakaitinta termoluminescencija (angl. *LHTL*). LHTL šviesos fotonai

pereina pro mėlyną – žalią šviesos filtrą (6) ir patenka į fotodaugintuvą (7). Fotodaugintuve šviesos fotonai paverčiami į elektronų kaskadas, kurios atpažįstamos kaip elektros srovė arba įtampa. Toliau elektrinis signalas paverčiamas skaitmeniniu. Kompiuterio (8) pagalba skaitmeninis signalas yra apdorojamas ir gaunami matavimo rezultatai [6].



1. 8 pav. LHTLD nuskaitymo sistemos struktūrinė schema. 1 – lazeris, 2 – šviesolaidis, 3 – lęšis, 4, 6 – optiniai filtrai, 7 – fotodaugintuvas, 8 – kompiuteris, 10 – dozimetras, 9 – oksidacinis sluoksnis [6]

LHTLD sistemoje naudojami dozimetrai (5), padengti plonu lazerio šviesą sugeriančios medžiagos sluoksniu. Pavyzdiniu atveju termoluminescencinio dozimetrom (9) medžiaga yra ličio fluoridas (LiF), padengta plonu nepermatomu vario oksido sluoksniu (10). Šis sluoksnis turėtų būti plonesnis nei 1 μm . Dozimetrams, pagamintiems iš kitų medžiagų padengti, gali būti naudojamas tokio paties storio grafito sluoksnis. [6]

1.2.5. Dujomis kaitinamų termoluminescencinių dozimetrom nuskaitymo sistemos

Dujomis kaitinamų dozimetrom nuskaitymo įrenginių sudėtyje yra kaitinimo sistema ir šviesos kvantų detektorius (fotodaugintuvas), kuriame nuskaitymo metu, fiksuojamas dozimetrom skleidžiamos šviesos intensyvumas.

Dujomis kaitinimų TLD nuskaitymo sistemoje, dozimetrom šildymo elementas turi vamzdelį, kuriuo dujos iš šaltinio teka link jo išėjimo ir yra išleidžiamos priešais nuskaitymą

TL dozimetra. Šis vamzdelis yra kaitinamas (arba jame yra įmontuota kaitinimo spiralė), siekiant perduoti šiluminę energiją dujoms ir taip jas įkaitinti. Vamzdelis turi būti laidus elektros srovei, nes prie jo prijungti elektrodai, kuriais teka reguliuojanti elektros srovė. Dujų temperatūros matavimui naudojamos termoporos. Jos išdėstytos vamzdelių galuose. Siekiant užtikrinti tikslią dozimetų pakaitinimo temperatūrą kiekvienu laiko momentu, termopora temperatūrinį signalą perduoda į elektros galios valdymo bloką, kuris reguliuoja elektros srovę, tekančią kaitinamaisiais elektrodais, kurie prijungti prie dujų vamzdelio. Dujų temperatūra reguliuojama keičiant srovės, tekančios per elektrodus, stiprį [23].

1.2.6. Karštu azotu kaitinamų TLD nuskaitymo sistema

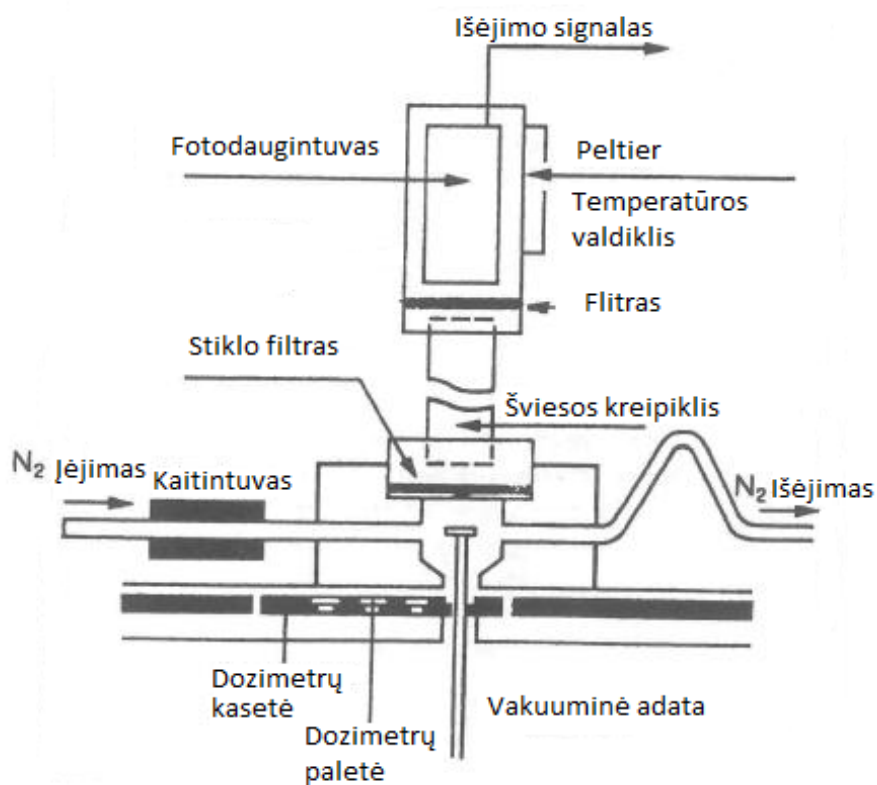
Termoluminescencinių dozimetų kaitinimui, gali būti naudojamos azoto dujos. Kaitinant dozimetrus didelio grynumo karštomis azoto dujomis, išgaunamas tolygus termoluminescencinio elemento kaitimas, dėl azoto atmosferos, o nesant deguoniui sumažėja kaitinimo elemento bei pačio dozimetro oksidacijos procesas, eliminuojamas chemiluminescencijos reiškinys. Tokiose sistemose yra paprasčiau kontroliuoti kaitinimo temperatūrą. Dėka šių charakteristikų, toks dozimetų kaitinimo metodas laikomas tiksliausiu bei patikimiausiu.

Termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo sistemoje (1.9 pav.) termoluminescenciniai dozimetrai kaitinami naudojant karštas azoto dujas. Termoluminescencinis švytėjimas, panaudojant šviesos kreiptuvus, patenka į fotodaugintuvą. Fotodaugintuve gautas elektrinis signalas keliauja į stiprintuvą, kur yra sustiprinamas, o sustiprintas signalas matuojamas naudojant elektroninius įtaisus. Matavimo sistemos stabilumas užtikrinamas nuolat ją tikrinat. Tikrinimui naudojamas didelio stabilumo atraminis šviesos diodas. Užfiksavus reikšmingą šaltinio stabilumo pakitimą matavimo procesas yra pertraukiamas [7].

Šviesos signalo registravimo sistema projektuota taip, kad gebėtų užtikrinti stabilius ir patikimus matavimo rezultatus esant mažoms dozių vertėms. Fotodaugintuvo vamzdis turi Peltier temperatūrinį valdiklį, užtikrinantį nuolatinį jautrumą. Šviesos kreiptuvus naudojamas nukreipti dozimetro skleidžiamai šviesai į fotodaugintuvo vamzdį [7].

Dozių skaičiavimams ir rezultatų apdorojimui naudojimas atskiras kompiuteris. Skaitytuvas perduoda užregistruotus ir matavimo sąlygų duomenis į kompiuterį, kur jie yra apdorojami ir apskaičiuojamos dozės [7].

Pagal duomenų apsaugos protokolą, ištikus duomenų perdavimo tarp skaitytuvo ir kompiuterio nesklandumams, operacijos nutraukiamos, taip neprarandant jokių duomenų [7].



1.9 pav. TLD skaitymo sistemos, kurioje TLD kaitinami karštu azotu, struktūrinė schema [7]

1.2 lentelė. TLD nuskaitymo sistemų lyginamoji analizė [5, 6, 7, 23, 24]

| TLD nuskaitymo sistema | Karštu oru kaitinanti | Karštomis azoto dujomis kaitinanti | Lazeriu kaitinanti |
|--|-----------------------|------------------------------------|--------------------|
| Kaitinimo elemento kontaktas su dozimetru | Ne | Ne | Ne |
| Palaikomos dozometro temperatūros stabilumas | Vidutinis | Aukštas | Aukštas |
| Fluorescencijos įtaka | Vidutinė | Maža | Maža |
| Chemoluminescencijos įtaka | Aukšta | Labai maža | Vidutinė |
| Triboluminescencijos įtaka | Maža | Maža | Maža |
| Dozimetro aušinimas azotu | Ne | Taip | Ne |
| Dozimetro oksidacija | Aukšta | Labai maža | Vidutinė |

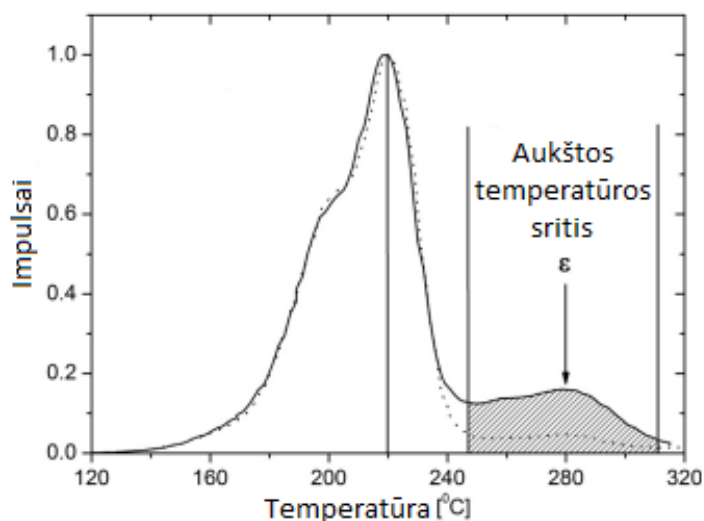
Atlikus termoluminescencinių dozimetų lyginamąją analizę (1.2 lentelė) matyti, kad daugiausia trūkumų turi karštu oru kaitinanti dozimetų nuskaitymo sistema. Mažiau trūkumų turi dozimetrus lazeriu kaitinanti matavimo sistema, tačiau joje nėra dozimetų aušinimo azoto dujomis funkcijos, bei matavimai atliekami deguonies atmosferoje, dėl ko vyksta dozometro oksidacija. Tiksliausia dozimetų nuskaitymo sistema yra karštomis azoto dujomis dozimetrus kaitinanti sistema. Šioje sistemoje dozimetų nuskaitymas atliekamas azoto atmosferoje, dėl ko nevyksta dozimetų oksidacija. Po nuskaitymo dozimetrai atšaldomi azoto dujomis, dėka staigaus atšaldymo nepakinta dozometro jautrumas.

1.3. Aukštos temperatūros santykio metodas

Radiacinėje saugoje, termoluminescenciniai dozimetrai dažniausiai naudojami sugertosios dozės matavimams. Iš sugertosios dozės matavimų metu surinktos informacijos, apie išilginę energijos perdavą (angl. *LET*), galima sužinoti panaudojus aukštos temperatūros santykio (angl. *High temperature ratio*) metodą. Šis metodas naudojamas nustatant sugertąją dozę ir vidutinę išilginę energijos perdavą, mišrios spinduliuotės atveju (kosminė spinduliuotė). Šis metodas naudojamas matuojant vidutinę išilginės energijos perdavą lėktuvuose skrydžio metu.

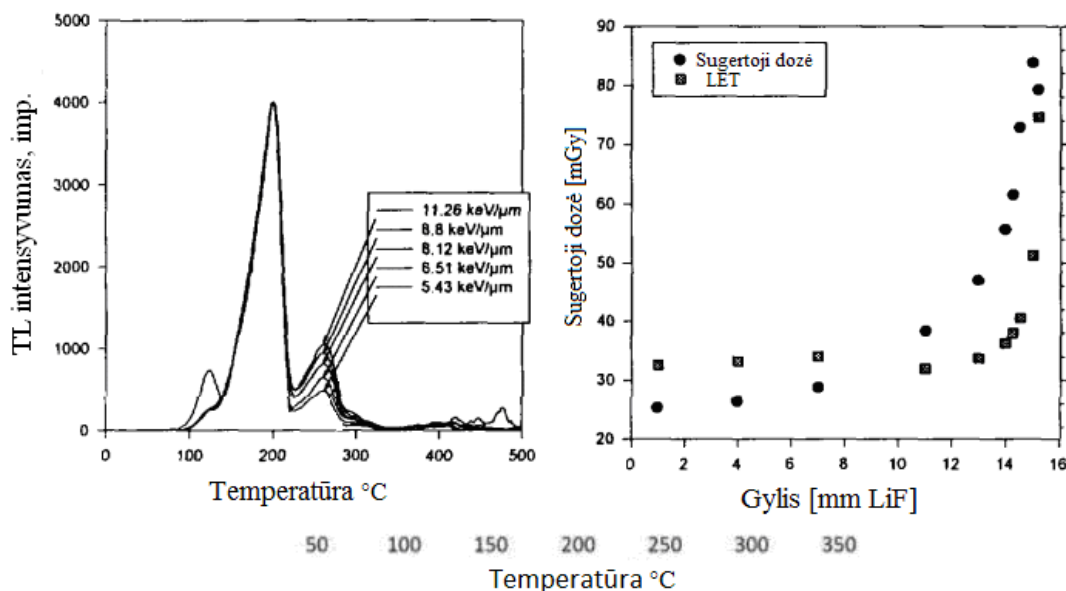
Dėl termoluminescencinių dozimetų paprasto naudojimo ir mažų gabaritų, mėginama HTR metodą pritaikyti radiologijoje.

Standartinėje dozimetrijoje sugertosios dozės įvertinimui naudojamas iššvyčio kreivės plotas iki 220 °C (5 pikas). Informacijai apie spinduliuotės LET gauti, analizuojami aukštos temperatūros pikai, esantys virš 220 °C temperatūros (1.10 pav.). Šių pikų intensyvumas didėja didėjant išilginei energijos perdavai [8, 9].



1.10 pav. Iššvyčio kreivės aukštos temperatūros sritis [9]

Termoluminescencinių dozimetų, apšvitintų nemoduliuotu protonų srautu, iššvyčio kreivės atvaizduojamos 1.11 paveiksle. Išilginės energijos perdavos nustatymui naudojamas kreivės plotas esantis 220 – 300°C temperatūrų srityje. Palyginimui, iššvyčio kreivės suvienodintos ties penktu pikų ir pateikiamos viename grafike.



1.11 pav. Dozimetų, apšvitintų skirtinga LET pasižyminčiais laukais, iššvyčio kreivių palyginimas kairėje, dešinėje – sugertosios dozės bei aukštos temperatūros santykio palyginimas [8]

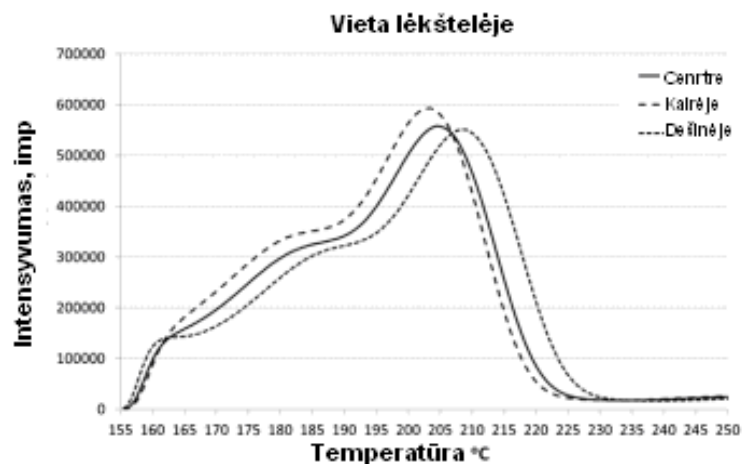
Atlikus kalibraciją, aukštos temperatūros santykio metodus, leidžia nustatyti nežinomos mišrios spinduliuotės, su skirtingomis didelės išilginės energijos perdavos

dalelėmis (pvz. C-12 jonai, F-19 jonai, alfa spinduliuotė, neutronai ar protonai), vidutinę išilginę energijos perdavą [8].

1.4. Nestandartinių matmenų termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo problemos

Dozometro nuskaitymo metu gauta iššvyčio kreivė priklauso nuo dozometro medžiagos, priemaišų kiekio, matavimo įrangos tikslumo ir nuo pačio dozometro pozicionavimo skaitymo įrenginyje. Atliekant nestandartinių matmenų termoluminescencinių dozimetų nuskaitymą, užtikrinti pozicionavimo tikslumą ypatingai sunku. Tokių dozimetų nuskaitymui naudojami skaitytuvai, kuriuose dozimetras patalpinamas ant metalinės lėkštelės, o ši nuskaitymo metu yra kaitinama.

Atliekant LiF:Mg,Ti termoluminescencinių dozimetų (matmenys 3 mm x 3 mm x 0,89 mm), apšvitintų $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta šaltiniu (dozės galia 0,8 Gy) nuskaitymą, naudota už dozimetrus didesnė lėkštelė (5 mm x 5 mm). Prieš apšvitinimą dozimetrai atkaitinti krosnelėje 400 °C, taip pilnai ištrinant likutinę informaciją ir pilnai atstatant pagavimo centrus. Lėkštelės ir dozimetų matmenų skirtumas leidžia 2 mm poslinkį horizontalia kryptimi, kas turi didelės įtakos T_{max} (temperatūra prie kurios stebimas iššvyčio kreivės maksimumas) reikšmei. Paveiksle 1.12 matyti, kad paslinkus dozimetą lėkštelėje iš kairės pusės į dešinę, T_{max} reikšmė nuo 203 °C pakinta iki 208,4 °C. Matavimų atsikartojamumas – 0,6-0,9 °C. Daroma prielaida, kad pikų pokyčius iššaukia temperatūros gradiento pokytis išilgai lėkštelės, kurį savo ruožtu lemia nevienodas jos storis [10].

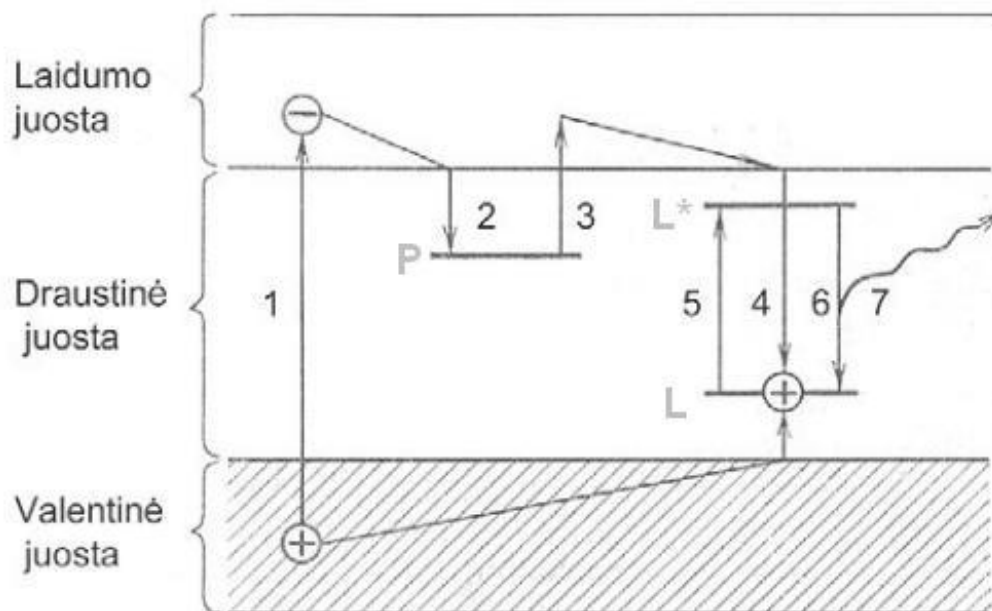


1.12 pav. Iššvyčio kreivės pokytis kintant dozimetų pozicijai skaitytuve [10]

2. TEORINĖ DALIS

2.1. Termoluminescencija

Jonizuojanti spinduliuotė kietuosiuose kūnuose sukelia fizikinių savybių pokyčius, šie pokyčiai gali būti naudojami sukauptajai dozei išmatuoti. Siekiant sustiprinti pokyčius vykstančius kietuose kūnuose, į medžiagą įterpiamos iš anksto parinktos priemaišos. Jonizuojanti spinduliuotė suaktyvina elektronus esančius valentinėje juostoje. Sužadinti elektronai iš valentinės juostos peršoka į laidumo juostą, kur yra pagaunami priemaišų centruose. Spinduliuotė registruojama trimis metodais: termoluminescencija, spalvinimu, radiofotoluminescencija.



2.1 pav. Termoluminescencijos procesas [11]

Termoluminescencinio matavimo metodo principas yra: paveikus medžiagą jonizuojančia spinduliuote (2.1 pav.), krūvininkai (elektronai ir skylės) telkiasi pagavimo centruose, dėl ko vyksta spinduliuotės energijos kaupimas. Sukaupta energija išlaisvinama papildomai sužadinus liuminoforą. Papildomas sužadinimas atliekamas liuminoforą pakaitinus arba apšvietus tam tikro bangos ilgio šviesa. Papildomo sužadinimo dėka, pasireiškia optiniai reiškiniai (liuminescencija, liuminoforo spalvos kitimas), kurie naudojami sugertosios energijos kiekiui nustatyti [11].

Draustinė juosta turinti elektronų gaudyklę P, kuri pagauna elektroną (2), šiam peršokus į laidumo juostą (1). Šuolio metu jonizuojančiosios spinduliuotės energija yra

sugerama. Siekiant išlaisvinti elektroną (3), kristalas yra kaitinamas. Išlaisvintas elektronas rekombinuoja (4) su skylė liuminescencijos centre L, taip jį sužadindamas (5) iki lygmens L*. Šuoliu (6), kuriuo metu grįžtama į pirminę būseną, išspinduliuojama spinduliuotė (7). Ši spinduliuotė vadinama termoluminescencine spinduliuote [11, 26].

Termoluminescencinių procesų kinetiką galima išreikšti kaip krūvininkų koncentracijos priklausomybę nuo laiko. Šią priklausomybę galima aprašyti taip [26]:

$$\frac{dn}{dt} = n_c(N - n)A - np ; \quad (1)$$

$$\frac{dn_h}{dt} = -n_c n_h A_r ; \quad (2)$$

$$\frac{dn_c}{dt} = np - n_c(N - n)A - n_c n_f A_r ; \quad (3)$$

čia n_c – elektronų koncentracija laidumo juostoje; n – elektronų koncentracija gaudyklėje; n_h – pagautų skylių koncentracija; N – aktyvių elektronų gaudyklių koncentracija; A – antrinio perėjimo pagavimas; A_r – rekombinacijos skerspjūvis.

Vykstant termostimuliacijai, termoluminescencinis intensyvumas, kaip laiko funkcija yra proporcinga elektronų ir skylių rekombinacijos greičiui [1]:

$$I(t) = -\frac{dn_h}{dt} ; \quad (4)$$

Dozimetrijoje dozių įvertinimui naudojama termoluminescencinio iššvyčio kreivė. Ja aprašoma termoluminescencijos intensyvumo priklausomybė nuo laiko. Analitiškai aprašant minėtą priklausomybę, būtina atsižvelgti į šiluminis dėsniumus.

Pirma ir trečia lygtys analitiškai nesprenžiamos, o naudojamos išraiškos [1]:

$$n_c \ll n; \quad \frac{dn_c}{dt} \ll \frac{dn}{dt} ; \quad (5)$$

Atsižvelgiant į rekombinacijos ir pakartotinio elektrono pagavimo tikimybę, naudojami du relaksacijos procesų tipai. Kuomet pakartotinio elektrono pagavimo tikimybė yra labai maža, vyksta pirmo lygio kinetikos procesas. Šio lygio kinetikos procese termoluminescencijos intensyvumas tiesiogiai proporcingas užpildytų gaudyklių koncentracijai [1]:

$$I(t) = pn = nS \exp\left(-\frac{E}{kT}\right); \quad (6)$$

Tiesiškai keičiantis temperatūrai, iššvyčio kreivę galima aprašyti tokia formule [1]:

$$I(T) = n_0 S \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left[-\frac{S}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right]; \quad (7)$$

čia T_0 – pradinė temperatūra; n_0 – pradinė elektronų koncentracija spąstuose; β – kaitinimo greitis.

Kuomet pagrindinis yra pakartotinio pagavimo procesas, taikomas antro lygmens kinetikos procesas. Termoluminescencijos intensyvumas proporcingas užpildytų gaudyklių koncentracijos kvadratui [1]:

$$I(t) = n^2 S' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right); \quad (8)$$

Kuomet linijinis kaitinimas [1]:

$$I(T) = n_0^2 S' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left[1 + (n_0^2 S' / \beta) \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right]^{-2}; \quad (9)$$

Kuomet negalima neatsižvelgti į nei vieną iš išvardintų procesų, tuomet naudojama bendros tvarkos kinetika [1]:

$$I(t) = n^b S' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right); \quad (10)$$

čia b - proceso kinetikos tvarka.

Termoluminescencijos iššvyčio kreivė esant bendros tvarkos kinetikai, aprašoma [1]:

$$I(T) = n_0 S'' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left[1 + ((b-1)S' / \beta) \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right]^{\frac{b}{b-1}}; \quad (11)$$

čia $S'' = S' n_0^{b-1}$.

Atlikus išraiškų apžvalgą, daroma išvada, kad termoluminescencijos intensyvumas yra proporcingas pradinei krūvininkų koncentracijai spąstuose ir sugertajai spinduliuotės energijai. Termoluminescencijos iššvyčio kreivė turi maksimumo smailę prie konkrečios

temperatūros T_m . Ši temperatūra yra proporcinga E (energetinio gylio spąstai). Padidinus tiesinį kaitinimo greitį, iššvyčio kreivės maksimumas pasislenka į aukštesnių temperatūrų sritį [1,26].

Praktikoje, sugertosioms dozėms įvertinti naudojami tik du iššvyčio kreivių parametrai: šviesos išeiga (integralinis metodas) bei maksimalus intensyvumas. Integraliniu metodu yra apskaičiuojamas plotas apribotas iššvyčio kreivės. Šis sugertosios dozės įvertinimo metodas yra tiksliausias ir pasižymi mažiausia priklausomybe nuo techninių nuskaitymo įrangos parametrų. Maksimalaus intensyvumo metodas jautresnis šilumos režimui, tačiau jis tikslesnis mažų dozių matavimui [2, 26].

Matavimo rezultatų tikslumas labai priklauso nuo spinduliuotės, kuria apšvitintos termoluminescencinės medžiagos. Spinduliuotė gali būti sudaryta iš plataus energinio spektro ar/ir nepastovios lauko geometrijos. Atliekant dozimetrų nuskaitymą susiduriama su trimis reiškiniais, kurie daro įtaką matavimo rezultatams. Šie reiškiniai yra fluorescencija, triboluminescencija ir chemoluminescencija.

Į matavimo terpę patekusi šviesa iš aplinkos sukelia papildomą termoluminescencinės medžiagos šviesos fotonų emitavimą. Šis reiškinys vadinamas fluorescencija. Triboluminescencija – tai reiškinys, kurio metu mechaniškai paveikta termoluminescencinė medžiaga emituoja papildomą šviesos fotonų kiekį, o chemoluminescencijos metu, matavimo terpėje esančios dujos (pvz. deguonis) sukelia papildomą šviesos fotonų emitavimą [27].

Norint užtikrinti matavimų rezultatų patikimumą, dozimetrų nuskaitymo metu minėtųjų veiksnių stengiamasi išvengti. Dozimetrų nuskaitymus atliekant patalpoje, į kurią nepatenka tiesioginiai saulės spinduliai, pašalinama fluorescencijos reiškinio įtaką matavimų rezultatams. Eliminuoiant chemoluminescenciją – nuskaitymo procedūra atliekama azoto (ne mažiau kaip 99,995% grynumo) atmosferoje. Taip pašalinamas papildomą fotonų emitavimą galintis sukelti deguonis. Azoto dujos taip pat pristabdo kaitinimo elemento bei pačio dozometro oksidacijos procesą. Saugantis nuo triboluminescencijos reiškinio, iki minimumo sumažinamas fizinis kontaktas su dozimetrine medžiaga [27].

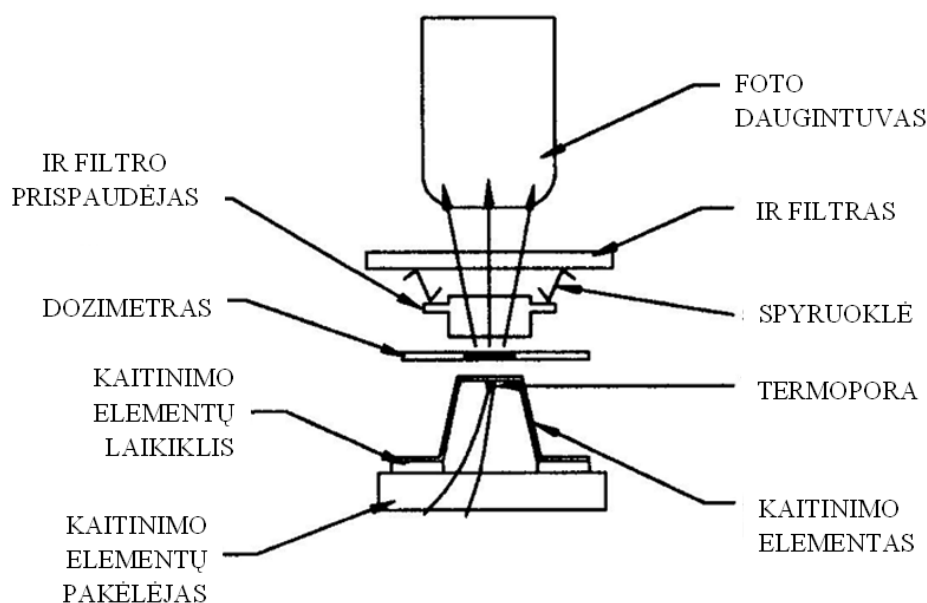
3. EKSPERIMENTINIAI METODAI IR ĮRANGA

3.1. RIALTO skaitytuvas

Dozimetrams nuskaityti naudojamas „RIALTO TLD“ termoluminescencinės dozimetrijos prietaisas. Jį sudaro skaitymo blokas, vaizduoklis, klaviatūra. Dozimetrų vėsinimui po atkaitinimo naudojamas azotas. Dozimetrų skaitymo bloko, kuriame atliekamas dozimetų kaitinimas, išspinduliuotų fotonų registravimas ir dozimetų atkaitinimas, principinė schema pavaizduota 3.1 paveiksle.

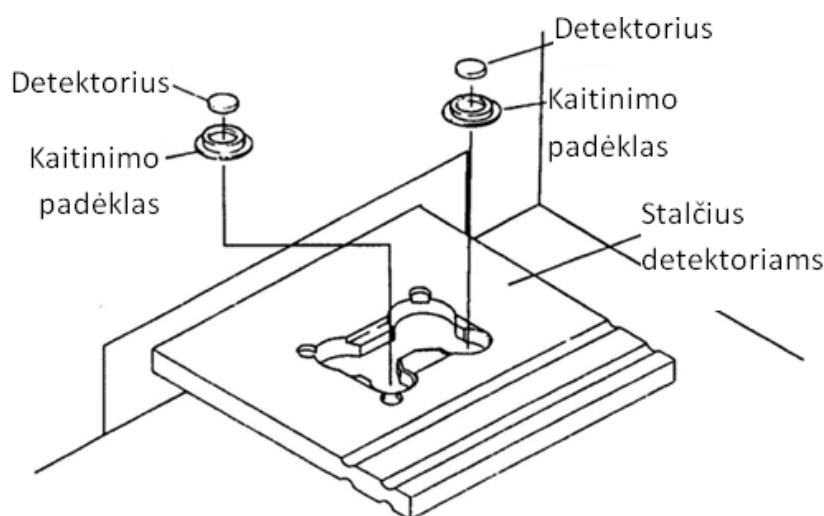
Prietaise yra išskirtos dvi sandarios matavimo kameros. Kiekvienoje kameroje naudojama atskira kaitinimo ir impulsų registravimo sistema. Tai leidžia vienu metu atlikti dviejų dozimetų nuskaitymą. Siekiant užtikrinti matavimų tikslumą bei atsikartojamumą kaitinimo elementų temperatūra palaikoma pastovi, vieno laipsnio tikslumu.

Nuskaitymo sistemoje, pakaitintų dozimetų išspinduliuotos šviesos srautas praeina infraraudonųjų spindulių filtrus ir patenka į fotodaugintuvą. Patekę į fotodaugintuvą šviesos fotonai paverčiami į elektrinį signalą, o vėliau naudojant srovė-dažnis keitiklį yra suskaitmeninamas. Keitiklio sukurtas impulsų skaičius proporcingas dozometro sugertajai dozei. Siekiant užtikrinti vienodą šviesos registravimo jautrumą, naudojami dviejų vidinių ekvivalentinių ^{14}C šaltinių rodmenys. Šie šaltiniai įmontuoti detektorių stalčiaus galuose ir jam esant pilnai atidarytam (dozimetrų pakeitimo metu) patenka tiesiai po fotodaugintuvu [12].



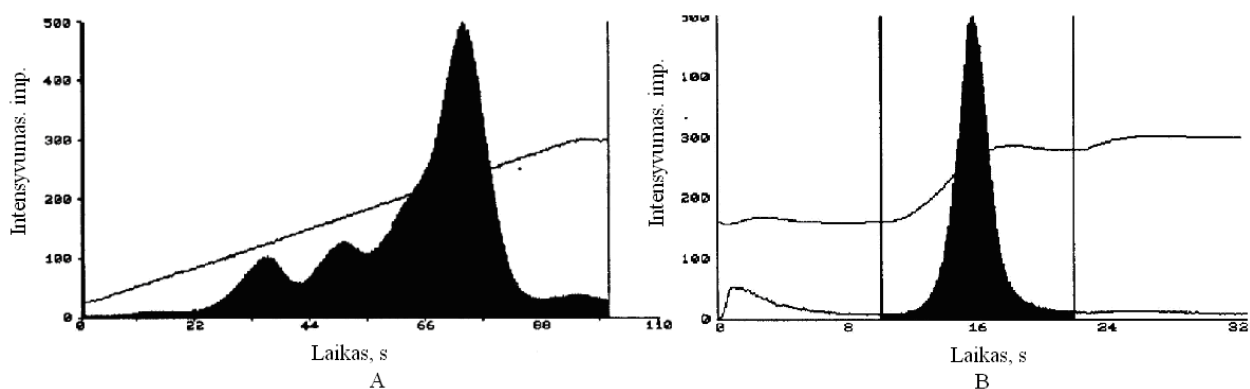
3.1 pav. „RIALTO TLD“ skaitytuvo, dozimetų nuskaitymo bloko principinė schema [12]

Dozimetrai į skaitytuvą (tarp kaitinamojo elemento ir fotodaugintuvo) patalpinami automatiniais stalčiais (3.2 pav).



3.2 pav. Dozimetų patalpinimo į skaitytuvą schema. [13]

Nuskaitymo metu TLD gali būti atkaitinami dviem būdais: tolydžiai ir pakopomis (3.3 pav.). Iš skirtingų medžiagų pagaminti termoluminescenciniai dozimetrai turi savitas iššvyčio kreives, todėl naudojant pakopinį kaitinimo režimą, galima išskirti mažos temperatūros pikų maksimumus nuo aukštos temperatūros pikų. Atliekant matavimus, stengiamasi išskirti mažų temperatūrų pikus, nes jie matavimams nenaudojami. Žemos temperatūros pikai yra santykinai nestabilūs ir kambario temperatūroje palaipsniui netenka saugomos informacijos. Aukštos temperatūros pikai priešingai – yra stabilūs ir kambario temperatūroje per tris mėnesius netenka tik 3 proc. saugomos informacijos [13].



3.3 pav. TLD iššvyčio kreivės pavaizduotos su kaitinimo temperatūros kreive, dozimetrus kaitinant tolygiai (a) ir pakopomis (b) [13]

Tyrimų metu dozimetų kaitinimo procese naudojamas pakopinis kaitinimo ciklas, todėl jį galima išskirti į tris dalis:

1. Dozimetų pašildymas. Prieš pradėdant atlikti matavimus, dozimetrai pakaitinami iki sąlyginai žemos temperatūros, siekiant išlaisvinti nestabilius, žemų temperatūrų pagavimo centrus.
2. Skaitymas. Skaitymo fazėje temperatūra pakeliama iki iš anksto nustatytos aukštos temperatūros. Vyksta intensyvus spinduliavimas, registruojami duomenys.
3. Atkaitinimas. Atkaitinimo tikslas – pašalinti liekamąjį signalą ir atstatyti pagavimo centrus.

Pasibaigus atkaitinimo etapui, dozimetras staigiai atšaldomas naudojant azotą. Toks staigus atšaldymas, kiekvieno matavimo metu leidžia išlaikyti nepakitusį dozometro jautrumą [28].

3.2. Dozimetų nuskaitymas

Termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo procedūros konkrečių parametrų vertes nurodo įrangos gamintojas. Kadangi dozimetų nuskaitymui naudojamas pakopinis kaitimo režimas, todėl svarbu, kad tarp atskirų pakopų temperatūra kistų kuo greičiau. Gamintojas rekomenduoja kaitinimo greitį pasirinkti 20 °C/s (maksimalus „RIALTO TLD“ įrenginio kaitinimo greitis yra 25 °C/s). Termoluminescencinių dozimetų nuskaitymas vyksta azoto atmosferoje, taip stengiantis apsaugoti dozimetrus bei matavimo įrangą nuo sparčios oksidacijos, kuri pasireiškia esant aukštomis temperatūroms bei nepageidaujamo fotonų emitavimo. Taip pat azotas naudojamas dozimetų aušinimui. Po atkaitinimo procedūros dozimetrai yra staigiai ataušinami, taip užtikrinant dozimetų ilgaamžiškumą bei stabilumą.

Pradiniame kaitinimo etape pašalinimas pašalinis termoluminescencinis signalas, kuris nesuteikia dozimetrinės informacijos. Tai atliekama dozimetrus pakaitinus iki ~100–160°C [28].

Sekančiame etape kaitinimo temperatūra padidinama iki ~300 °C (priklausomai nuo nuskaitymo dozometro tipo). Esant tokiai temperatūrai, išlaisvinami termoluminescencinės medžiagos draustinės juostos gaudyklėse pagauti elektronai. Šio proceso metu vyksta termoluminescencinis spinduliavimas, kurio intensyvumas matuojamas fotodaugintuvu.

Paskutiniame etape vyksta dozimetų atkaitinimas. Jo metu temperatūra padidinama iki 300-400 °C, kas leidžia išlaisvinti likusius pagavimo centruose esančius elektronus. Tokiu

būdu iš dozimetrom ištrinama visa likutinė informacija ir dozimetras paruošiamas pakartotiniam naudojimui.

Gamintojo išskiriami trys termoluminescencinių dozimetrom atkaitinimo būdai:

1. Atkaitinimas tik RIALTO įrenginiu.
2. Atkaitinimas krosnyje.

Atkaitinimas krosnyje atliekamas 1-2 valandas prie 400 °C temperatūros, vėliau temperatūra sumažinama iki 80 °C ir dozimetrai šioje temperatūroje paliekami dar 16-24 valandoms. Temperatūros mažinimo greitis turėtų būti -60 °C/val.).

Atkaitinimą atliekant krosnyje, padidinamas dozimetrom nuskaitymo greitis (nereikalingas trečias, atkaitinimo etapas). Tačiau, krosnyje atkaitintų dozimetrom jautrumas sumažėja 2-3 kartus vien dėl lėto aušinimo proceso. Atkaitinimo metu 80°C temperatūros fazėje iki minimumo sumažinami iššvyčio kreivių žemų temperatūrom pikai. Taip pat iki minimumo sumažinamas savaiminis dozimetrom užregistruotų energijų nykimas.

3. Atkaitinimas RIALTO įrenginiu bei išorine krosnele.

RIALTO įrenginio bei išorinės krosnelės (80 °C temperatūra) kombinacija užtikrina didelį dozimetrom jautrumą bei iki minimumo sumažina savaiminį dozimetrom užregistruotų energijų nykimą [28].

3.3. Matavimai

Atliekant matavimus su „Pin worms“ dozimetrais, „RIALTO TLD“ įrenginio nustatymai (3.1 lent.) parinkti atsižvelgiant į dozimetrom charakteristikas.

3.1 lentelė. „RIALTO TLD“ parametrai atliekant „pin worms“ dozimetrom nuskaitymą [28]

| Pakaitinimo temperatūra, °C | Pakaitinimo laikas, s | Skaitymo temperatūra, °C | Skaitymo laikas, s | Atkaitinimo temperatūra, °C | Atkaitinimo laikas, s |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 160 | 10 | 300 | 12 | 300 | 40 |

Dozimetrom nuskaitymo įrenginiu „RIALTO TLD“ registruojamas šviesos impulsų skaičius. Iš teorinių šaltinių yra žinoma, jog užregistruotų impulsų skaičius yra proporcingas dozimetrom sugertajai dozei. Iš užregistruotų impulsų skaičiaus skaičiuojant dozimetrom sugertąją dozę reikia atlikti keletą matematinių veiksmų.

Skaičiuojant dozometro sugertąją dozę pirmas žingsnis yra atlikti užregistruotų impulsų korekciją (12 formulė) naudojant individualius dozimetrų kalibracijos koeficientus.

$$I * D_{kk} = I_p; \quad (12)$$

čia I – užregistruotas impulsų skaičius; D_{kk} – kalibracinis dozių koeficientas; I_p – koreguotas impulsų skaičius [30].

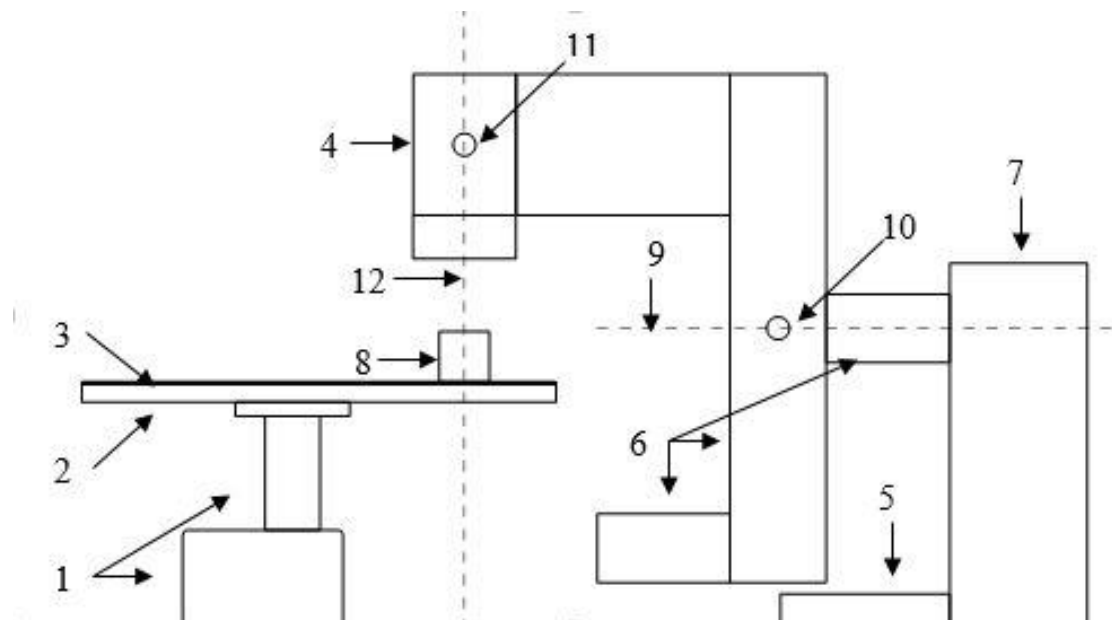
Atlikus impulsų skaičiaus korekciją, galima skaičiuoti dozometro sugertąją dozę (13 formulė).

$$D_i = \frac{I_p}{I_k} * K_d; \quad (13)$$

čia I_k – kalibracijos metu užregistruotų impulsų skaičiaus vidurkis; K_d – kalibracinė dozė; D_i – išmatuota dozė [30].

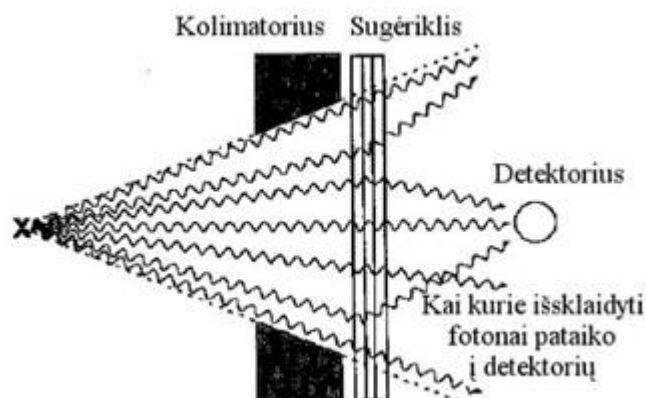
3.4. Kalibravimas

„Pin worms“ dozimetrai kalibruojami naudojant teleterapijos įrenginį ROKUS-M, kuriame įmontuotas ^{60}Co šaltinis (spinduliuotės energija yra $\sim 1,25 \text{ MeV}$) (3.4 pav).



3.4 Pav. Dozimetrų kalibracijai naudoto ROKUS-M įrenginio struktūrinė schema. 1 – procedūrinio stalo laikiklis, 2 – procedūrinio stalo kraštai, 3 – stalo paviršius, 4 – spindulių šaltinis, 5 – įrenginio atramos, 6 – spinduliavimo šaltinio padėties nustatymo mechanizmas, 7 – įrenginio elektros mazgas, 8 – dozimetrų vieta, 9 – horizontali sukimo ašis, 10 – konvergencijos ašis, 11 – šaltinio sukimosi ašis, 12 – spinduliuotės ašis.

Kalibracijos metu naudota plataus lauko geometrija (3.5 pav).



3.5 Pav. Plataus spinduliuotės lauko geometrija

Plataus spinduliuotės lauko geometrijos privalumas yra galimybė apšvitinti didesnę paviršiaus plotą, tačiau tokios geometrijos trūkumas – dalis išsklaidytų fotonų gali pasiekti detektorių.

Kalibravimo procedūros metu dozimetrai apšvitinti 5 Gy doze. Apšvitimo laikas apskaičiuotas naudojantis šaltinio skilimo koeficientu (3.2 lentelė). Atstumas nuo šaltinio iki stalo paviršiaus 1m, apšvitimo lauko dydis 10 x 10 cm.

3.2 lentelė. Kalibracinio šaltinio parametrai

| Šaltinio kalibravimo data | Kalibravimo galingumas, Gy/min | Apšvitinimo data | Dienų sk. po kalibravimo | Skilimo koeficientas | Galingumas, Gy/min | Švitinimo trukmė, s (5 Gy) |
|---------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------|----------------------|--------------------|----------------------------|
| 2014-01-21 | 0,1994 | 2015-12-21 | 699 | 0,8437 | 0,15505 | 1934 |

3.5. Matavimų neapibrėžtys

Vertinant TLD dozimetų nuskaitymo, naudojant RIALTO skaitytuvą, neapibrėžtį, laikytasi nuostatos, kad išplėstinės neapibrėžties dedamosios nekoreliuoja tarpusavyje. Todėl paprasčiau tai galima užrašyti:

$$U(D) = (U_{kal}^2 + U_{TLD}^2 + U_E^2 + U_F^2 + U_R^2 + U_T^2 + U_{BS}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo įrenginio RIALTO bendra išplėstinė neapibrėžtis, kurią nurodo gamintojas (atsižvelgiant tik į impulsų vertinimą) negali viršyti 5 proc ($U_{TLD} = 5\%$) [13].

Neapibrėžtis, kuri yra sietina su termoluminescencinio dozometro signalo priklausomybe nuo jonizuojančiosios spinduliuotės, žymima U_E . Įvertinus tai, jog nuskaitomi dozimetrai apšvytinti ^{192}I šaltiniu, kurio spinduliuotės spektras yra platus, o vidutinė energija $\sim 0,38\text{MeV}$, ši neapibrėžtis laikoma 10% [29].

Termoluminescenciniai dozimetrai pasižymi signalo silpimu laike (angl. *fading*). Per 12 savaičių nuo apšvitos dienos, dozimetų atsakas susilpnėja 5 proc. Tyrimo metu, dozimetrai buvo nuskaitomi praėjus mažiau nei dviem savaitėms po apšvitinimo, todėl neapibrėžtis susijusi su signalo silpimu laikoma 1% (U_F) [30].

Neigiama termoluminescencinių dozimetų savybė yra atsako kampinė priklausomybė. Šaltiniuose ji įvertinama įvairiai nuo 5% iki 10%. Skaičiavimuose taikoma didžiausia pateikiama nepibrėžties vertė – 10%, todėl U_K lygi 10% [32].

Įstačius reikšmes į formulę (14) apskaičiuota išplėstinė neapibrėžtis nuskaitant dozimetrus RIALTO skaitytuvu yra apytiksliai lygi 15 proc.

4. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

4.1. TLD nuskaitymo sistemos RIALTO funkcionalizavimas

Naudotame termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo įrenginyje „RIALTO TLD“ įmontuotas 8 bitų procesorius bei 20 MB talpos, RLL metodu duomenis koduojantis kietasis diskas. Trumpinys RLL (angl. *Run Length Limited*) išvertus į lietuvių kalbą reiškia „su riboto ilgio tarpu“. Šį metodą sukūrė IBM kompanija ir iš pradžių jį taikė tik didelių kompiuterių diskiniuose kaupikliuose. Personaliniuose kompiuteriuose šis duomenų kodavimo metodas pradėtas taikyti nuo 1980-tųjų metų. „RIALTO TLD“ sistemoje, duomenų perkėlimui numatytas 5,25 colių diskelių įrenginys (disko vidinė atmintis nuo 130 iki 360 kB). Įvertinus operacinės sistemos užimamą kietojo disko vietą, išmatuotų rezultatų saugojimui lieka mažiau nei pusė atminties vietos.

Dar vienas RIALTO TLD skaitymo sistemos trūkumas – duomenų eksportavimas. Minėta, kad duomenų perkėlimui ar saugojimui naudojami 5,25 colių diskai, kurių skaitytuvai šiuolaikiniuose kompiuteriuose jau nebėra naudojami, o ir pačių diskų nebėra prekyboje. Dėl šių priežasčių gamintojų įmontuotas kietasis diskas yra pakeičiamas įdiegiant modernią atminties laikmeną, leisiančią kaupti didesnę duomenų kiekį, nesunkiai perkelti sukauptus matavimų rezultatus bei sumažinanti elektrinius triukšmus. Esant mažesniems

triukšmams, funkcionalizuota termoliuminescencinių dozimetų nuskaitymo sistema bus tinkama atlikti mažų dozių matavimus, taip praplečiant matavimo diapazoną.

Norint įvykdyti numatytą „RIALTO TLD“ skaitytuvo funkcionalizavimą, buvo pasirinkta atnaujinti naudojamą atminties kaupiklį. Kadangi dabartinės duomenų laikmenos naudoja didesnio pralaidumo duomenų magistralės (>16bit) reikalingas keitiklis, leidžiantis tokias laikmenas naudoti su 8 bitų procesoriais. Dėl santykinio paprastumo buvo pasirinkta naudoti ATA sąsaja modernių laikmenų prijungimui. ATA sąsaja dažniausiai naudojama kietųjų diskų, optinių įrenginių bei kietakūnių laikmenų prijungimui prie kompiuterio magistralių. Standartiniai 8 bitų ATA keitikliai nėra tinkami RIALTO TLD įrenginiui dėl pačio įrenginio specifikos (procesoriaus atminties adresavimas, RAM paskirstymas tarp jau esančių įrenginių). Dėl šios priežasties buvo būtina peržiūrėti pačio keitiklio programinį kodą ir aparatūrinę schemą.

Programinis kodas parašytas naudojant „Assembler“ programa. Ši programa pasirinkta siekiant maksimalaus suderinamumo su „RIALTO TLD“ kompiuterio XT (angl. eXtended Technology) architektūra. Programinis kodas turi įvertinti santykinai mažą procesoriaus taktinį dažnį (8MHz) ir magistralės pločio pokytį. Magistralės pločio pokyčiui naudojami atminties peradresavimo algoritmai. Taktiniam dažniui įvertinti naudojami laikmačiai (angl. *Timer*) priverčiantys atminties įrenginį laukti duomenų, kol jie bus perduoti iš pagrindinės kompiuterio atminties. Keletas pagrindinių kodo dalių pateikta žemiau.

```
; Pasiruošimas nuskaityti duomenis į ESS1
mov     bx, g_rgfnPioRead
      call InitializePiovarsInSSBPwithSectorCountInAH
#ifdef USE_AT
      jc     SHORT ReturnWithTransferErrorInAH
#endif
      ; Laukimas iki kol atmintis bus pasirengusi duomenų perdavimui
      call  IdeWait_IRQorDRQ
      jc     SHORT ReturnWithTransferErrorInAH
      xchg  si, di
      mov   cx, [bp+PIOVARS.wSectorsInBlock]
ALIGN JUMP_ALIGN
.ReadNextBlockFromDrive:
      mov   dx, [bp+PIOVARS.wDataPort]
      cmp   [bp+PIOVARS.bSectorsLeft], cl
      jbe   SHORT .ReadLastBlockFromDrive
      call  [bp+PIOVARS.fnXfer]
      xchg  di, si
      call  IdeWait_IRQorDRQ
      jc     SHORT ReturnWithTransferErrorInAH
      xchg  si, di
      ; Sėkmingai nuskaitytu sektorių taškinis skaičius
```

```

mov     cx, [bp+PIOVARS.wSectorsInBlock]
sub     [bp+PIOVARS.bSectorsLeft], cl
add     [bp+PIOVARS.bSectorsDone], cl
jmp     SHORT .ReadNextBlockFromDrive

```

ALIGN JUMP_ALIGN

.ReadLastBlockFromDrive:

```
mov     cl, [bp+PIOVARS.bSectorsLeft]
```

```
push   cx
```

```
call   [bp+PIOVARS.fnXfer]
```

```
; Klaidų tikrinimas paskutiniam bloke
```

```
mov     di, si
```

```
CheckErrorsAfterTransferringLastBlock:
```

```
mov     bx,          TIMEOUT_AND_STATUS_TO_WAIT(TIMEOUT_DRQ,
```

FLG_STATUS_BSY)

```
call   IdeWait_PollStatusFlagInBLwithTimeoutInBH
```

```
pop     cx          ; [bp+PIOVARS.bSectorsLeft]
```

```
jc     SHORT ReturnWithTransferErrorInAH
```

```
; Visi sektoriai sėkmingai perduoti
```

```
add     cx, [bp+PIOVARS.bSectorsDone]
```

```
; Sėkmingai nuskaitytų sektorių numerio gražinimas
```

ReturnWithTransferErrorInAH:

```
%ifdef USE_386
```

```
movzx  cx, [bp+PIOVARS.bSectorsDone]
```

```
%else
```

```
mov     cl, [bp+PIOVARS.bSectorsDone]
```

```
mov     ch, 0
```

```
%endif
```

```
ret
```

Nuskaitymo metu kaip ir iš visų blokinių atminties įrenginių pasirenkamas atminties adresas ir atliekama nuskaitymo procedūra. Įvertinamos galimos klaidos ir veiksmai joms atsiradus. Dėl mažo procesoriaus taktinio dažnio (8MHz) įrašymo procedūra vyksta po vieną baitą vienu metu.

ALIGN JUMP_ALIGN

WriteToDrive:

```
; Pasiruošimas duomenų iš ESSI įrašymui
```

```
mov     bx, g_rgfnPioWrite
```

```
call   InitializePiovarsInSSBPwithSectorCountInAH
```

```
%ifdef USE_AT
```

```
jc     SHORT ReturnWithTransferErrorInAH
```

```
%endif
```

```
mov     bx,          TIMEOUT_AND_STATUS_TO_WAIT(TIMEOUT_DRQ,
```

FLG_STATUS_DRQ)

```
call   IdeWait_PollStatusFlagInBLwithTimeoutInBH
```

```
jc     SHORT ReturnWithTransferErrorInAH
```

```
mov     cx, [bp+PIOVARS.wSectorsInBlock]
```

ALIGN JUMP_ALIGN

.WriteNextBlockToDrive:

```
mov     dx, [bp+PIOVARS.wDataPort]
```

```

cmp      [bp+PIOVARS.bSectorsLeft], cl
jbe     SHORT .WriteLastBlockToDrive
call    [bp+PIOVARS.fnXfer]

; Sekančio bloko laukimas ir klaidų tikrinimas
call    IdeWait_IRQorDRQ
jc      SHORT ReturnWithTransferErrorInAH

; Sėkmingai įrašytų sektorių taškinis skaičius
mov     cx, [bp+PIOVARS.wSectorsInBlock]
sub     [bp+PIOVARS.bSectorsLeft], cl
add     [bp+PIOVARS.bSectorsDone], cl
jmp     SHORT .WriteNextBlockToDrive

```

ALIGN JUMP_ALIGN

.WriteLastBlockToDrive:

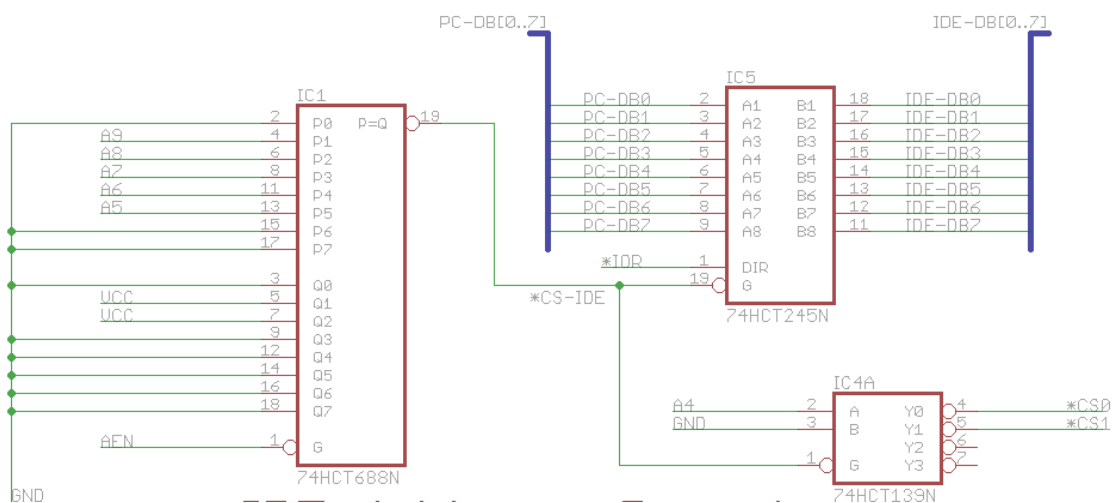
```

mov     cl, [bp+PIOVARS.bSectorsLeft]
push   cx
call    [bp+PIOVARS.fnXfer]
jmp     SHORT CheckErrorsAfterTransferringLastBlock

```

Įrašymo, kaip ir nuskaitymo metu, duomenys įrašomi į pasirinktą atminties adresą, vertinamos galimos klaidos.

Kuriant keitiklio aparatūrinę įrangą buvo remiamasi jau esamais magistralių pločio/dažnio keitikliais, pritaikant juos RIALTO TLD įrenginiui. Viena pagrindinių aparatūrinės įrangos specifikacijų buvo ta, kad keitiklis turi įsijungti į ISA magistralę. Dėl šios priežasties buvo svarbu vertinti maitinimo šinių apkrovą (teisingai parinkti pasyvinius elementus) bei užtikrinti, kad signalų lygis neviršys TTL lygio (5V). TTL išlaikymui buvo naudojamos tik mikroschemos veikiančios TTL lygiu.

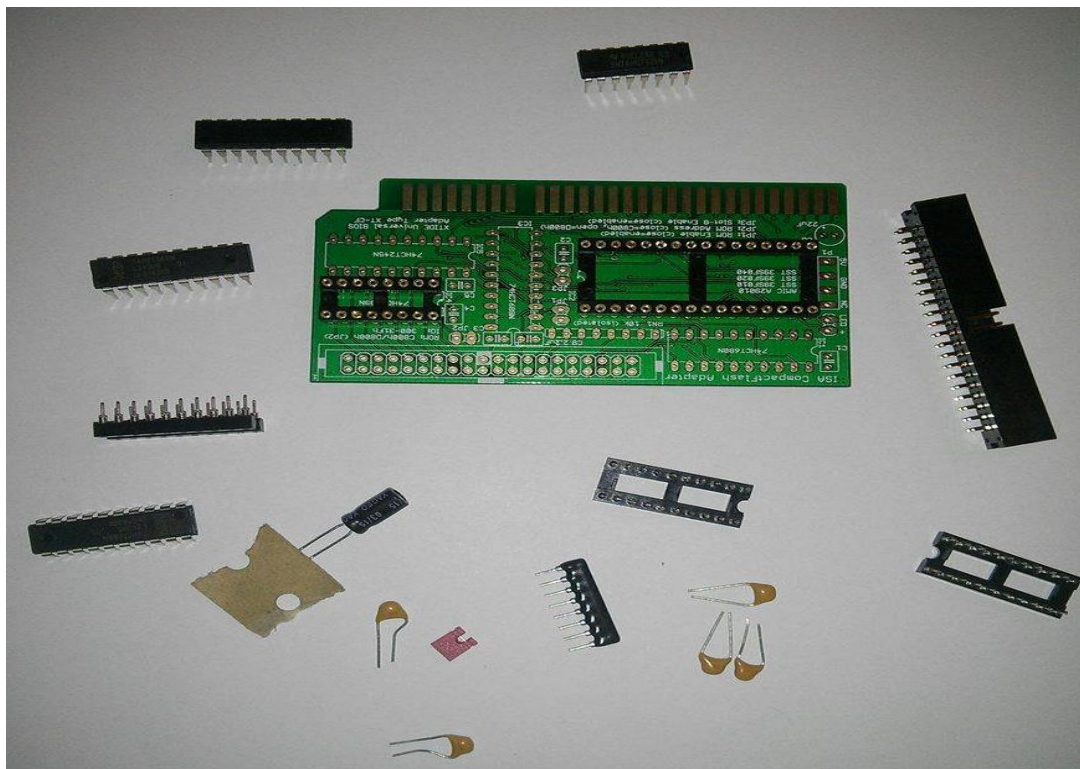


4.1 pav. Magistralės peradresavimo schema

Paveiksle 4.1 pateikta schemos dalis atliekanti magistralės peradresavimą 8×16 bitų. Schemoje matyti parinktų mikroschemų tipai bei jungimo būdas (mėlynos linijos žymi magistralinius jungimus).

Laikantis mikroschemų gamintojų pateikiamų specifikacijų yra parenkami pasyviniai elementai. Naudojamų pasyviųjų elementų nominalai svarbūs norint užtikrinti TTL lygį keitiklio išėjime, bei neperkrauti maitinimo šaltinio (užtikrinti stabilų keitiklio darbą). Pagrindinių aparatūrinių blokų schema pateikta 1 priede. Atlikus pirminį schemos projektavimą buvo suprojektuota spausdintinė plokštė. Spausdintinė plokštė turi atitikti ISA sąsajos geometrinius reikalavimus.

Keitiklį sudarantys komponentai pateikti 4.2 paveiksle, o jų specifikacijos – 4.1 lentelėje.



4.2 pav. Keitiklio spausdintinė plokštė bei reikiami komponentai

4.1 lentelė. Keitiklį sudarančių komponentų sąrašas

| Pozicija | Tipas / Nominalas | Aprašymas |
|----------|-----------------------|------------------------------|
| IC1, IC3 | 74HCT688N | Loginis 8 bitų komparatorius |
| IC2 | SST39SF010A-70-4C-PHE | Atmintinė (1MBit) |
| IC4 | 74HCT139N | Dekoderis, demultiplekseris |

| | | |
|--------------------|------------------|--------------------------------|
| IC5 | 74HCT245N | Siųstuvai |
| RN1 | 10k | Keturių elementų varžų matrica |
| C1, C2, C3, C4, C5 | 0.1uF | Keramikinis kondensatorius |
| C6 | 10uF | Elektrolitinis kondensatorius |
| HD1 | T821140A1S100CEU | ATA sąsajos lizdas |

Surinkus keitiklį į jį įstatoma atmintinė su įrašyta programine įranga. Sukonstruotas keitiklis, su jame įstatyta atminties kortele pateikiamas 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Surinktas keitiklis su įstatyta atminties kortele

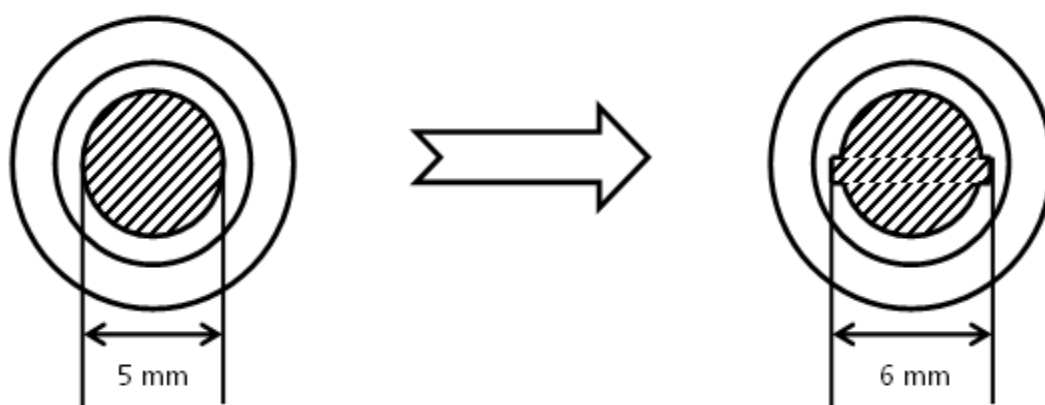
Vietoje ATA sąsajos kietojo disko (angl. *hard disk drive*) buvo pasirinkta naudoti kietakūnė atminties kortelė (angl. *Compact Flash*) su ATA keitikliu. Naudojant atminties kortelę sumažinamas įrenginyje susidarantis elektromagnetinis triukšmas. Prieš tai naudotame kietajame diske dėl judančių detalių, bei senų technologijų, maitinimo bloke buvo registruojami dideli elektriniai triukšmai. Kadangi šviesos fotonų skaičiavimui naudojamas fotodaugintuvas, kuriam reikalinga didelė įtampa, kuri savo ruožtu generuojama iš pagrindinių maitinimo įtampų (5 ir 12V), todėl kietajame diske atsiradę elektriniai triukšmai gali prasiskverbti ir į šias grandines. Fotodaugintuve susidarantis triukšmas didina rezultatų dispersiją. Pakeitus technologiškai pasenusį kietąjį diską į sukonstruotą atmintinės modulį

nustatyta, kad pagerėjo signalas triukšmas santykis, kas leidžia gauti stabilesnius fotodaugintuvo sustiprintus signalus. Mažas elektromagnetinis triukšmas padidina skaitytuvo jautrumą, taip praplečiant registruojamų dozių diapazoną.

Naudojant senos kartos RIALTO skaitytuvo 8 MHz procesorių, neįmanomas gautų duomenų apdorojimas moderniomis kompiuterinėmis programomis. Todėl funkcionalizavus įrenginį įdiegiant surinktą atminties modulį, atsiranda galimybė matavimo rezultatus perkelti į modernų kompiuterį ir atsiveria naujos duomenų apdorojimo galimybės. Pasinaudojus šiandieninėmis duomenų apdorojimo programomis galima atlikti Furje transformacijas, dekonvoliucijas ir kitas matematinės operacijas. Taip pat turint iššvyčio kreives, galima tiksliau atskirti kur prasideda tikrasis termoluminescencinis švytėjimas, o kur dar stebimas pašalinis, žemų temperatūrų švytėjimas.

Į dozimetų nuskaitymo sistemą „RIALTO TLD“ įmontavus surinktą atmintinę, žymiai sutrumpėjo matavimo sistemos užregistruotų duomenų įrašymo bei atkūrimo laikas. Naujos atmintinės maksimalus duomenų įrašymo ir nuskaitymo greitis yra 10 Mb/sek, t.y. atmintinės greitis yra bent 3 kartus didesnis nei senojo kietojo disko. Didelė duomenų įrašymo ir nuskaitymo sparta leidžia ne tik greičiau atlikti pirminį duomenų apdorojimą RIALTO skaitytuvu, bet ir sumažinamas bendras dozimetų nuskaitymo laikas, padidėja darbo našumas.

Atsižvelgiant į nestandartinę naudojamų dozimetų formą (ne TLD tabletės) buvo sukonstruoti specialūs laikikliai dozimetams (tabletėms ar strypeliams) nuskaityti (4.4 pav.).



4.4 pav. Dozimetų laikiklių pritaikymas naujo tipo TLD-100 dozimetų nuskaitymui

4.2. TLD nuskaitymo sistemos „RIALTO TLD“ funkcionalumo tyrimas

4.2.1. TLD kalibravimas

Pirmajame funkcionalizuotos TLD nuskaitymo sistemos „RIALTO TLD“ tyrimo etape, vertinamas gaunamų matavimo rezultatų atsikartojamumas. Šiuo tikslu atlikta lyginamoji termoluminescencinių LiF: Mg, Cu, P (vadinamų „pin worms“) dozimetų kalibracijos procedūra.

Prieš kalibraciją, dozimetrai pakartotinai atkaitinti, kad būtų ištrinta likutinė informacija. Papildomas atkaitinimas atliktas pakartojant dozimetų nuskaitymo procedūrą.

Kalibracijos metu, 5 Gy doze, apšvitintos dvi grupės LiF: Mg, Cu, P dozimetų (grupėje trisdešimt trys dozimetrai). Švitinimas atliktas naudojant minėtąjį teleterapijos įrenginį ROKUS-M. Švitinimo procedūros trukmė apskaičiuota atsižvelgiant į šaltinio aktyvumą tai dienai (3.2 lent.).

Pirmos apšvitintų dozimetų grupės nuskaitymas atliktas su originalia „RIALTO TLD“ termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo sistema, o antros grupės dozimetų nuskaitymas atliktas naudojant funkcionalizuotą „RIALTO TLD“ dozimetų nuskaitymo sistemą.

Laikantis termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo įrangos gamintojų rekomendacijų, RIALTO įrenginys įjungtas 15-30 min. iki dozimetų nuskaitymo pradžios (laikas, per kurį sistema pasiekia darbinę temperatūrą). Siekiant išvengti fluorescencijos matavimai atlikti tamsioje patalpoje.

Iš užregistruotų impulsų skaičiaus apskaičiuoti kalibraciniai koeficientai (DKK), kurie išreiškiami, kaip kalibruojamos termoluminescencinių dozimetų grupės vidutinio impulso skaičiaus santykis su pasirinkto dozimetrom impulsų skaičiumi (15 formulė) [30].

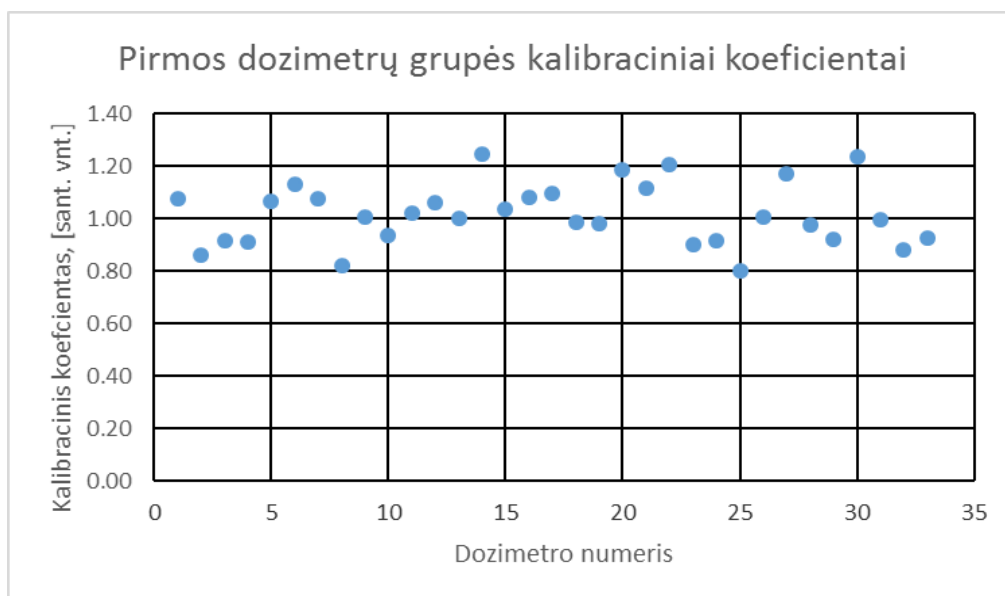
$$DKK_i = \frac{\langle S \rangle}{S_i} ; \quad (15)$$

čia DKK_i – pasirinkto dozimetrom kalibracijos koeficientas, $\langle S \rangle$ - vidutinis kalibruojamų dozimetrom grupės TL signalo intensyvumas, S_i – pasirinkto dozimetrom TL signalo intensyvumas.

Apskaičiuoti pirmos dozimetų grupės kalibraciniai koeficientai pateikiami 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Pirmos dozimetų grupės kalibraciniai koeficientai

| Dozimetro numeris | Kalibracinis koeficientas | Dozimetro numeris | Kalibracinis koeficientas | Dozimetro numeris | Kalibracinis koeficientas |
|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| 1 | 1,08 | 12 | 1,06 | 23 | 0,90 |
| 2 | 0,86 | 13 | 1,00 | 24 | 0,92 |
| 3 | 0,92 | 14 | 1,25 | 25 | 0,80 |
| 4 | 0,91 | 15 | 1,04 | 26 | 1,01 |
| 5 | 1,07 | 16 | 1,08 | 27 | 1,17 |
| 6 | 1,13 | 17 | 1,10 | 28 | 0,98 |
| 7 | 1,08 | 18 | 0,99 | 29 | 0,92 |
| 8 | 0,82 | 19 | 0,98 | 30 | 1,24 |
| 9 | 1,01 | 20 | 1,18 | 31 | 1,00 |
| 10 | 0,94 | 21 | 1,12 | 32 | 0,88 |
| 11 | 1,02 | 22 | 1,21 | 33 | 0,93 |



4.5 pav. Pirmos dozimetų grupės (nuskaitytų originalia nuskaitymo sistema) kalibracinių koeficientų pasiskirstymas

Grafiškai kalibracinių koeficientų išsibarstymas pateikiamas 4.5 paveiksle.

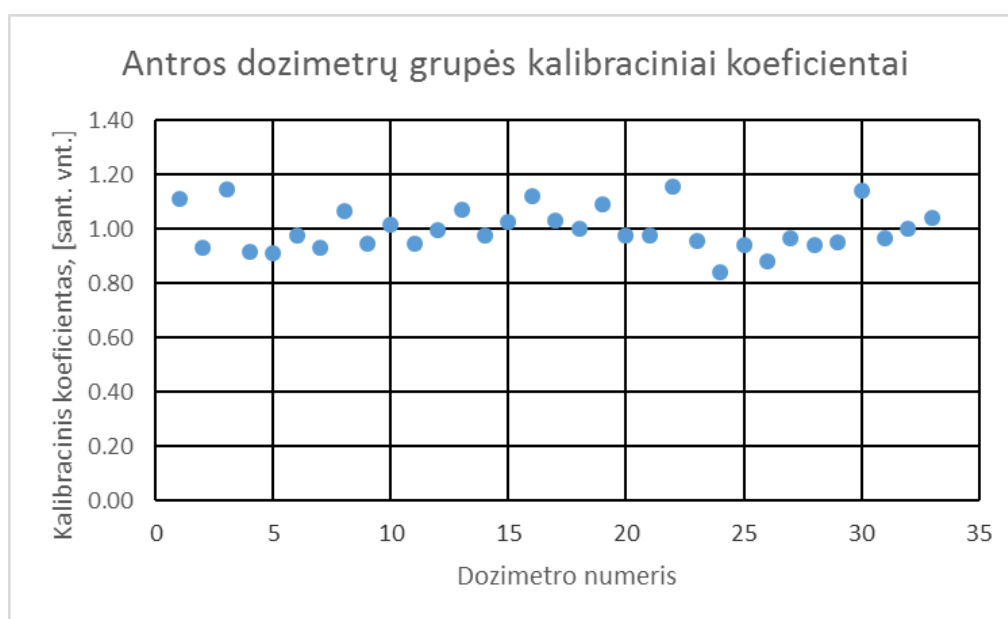
Antros grupės „Pin worm“ dozimetų nuskaitymas atliktas naudojant funkcionalizuotą „RIALTO TLD“ sistemą.

Apskaičiuoti kalibraciniai koeficientai pateikti 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė Antros dozimetų grupės kalibraciniai koeficientai

| Dozometro numeris | Kalibracinis koeficientas | Dozometro numeris | Kalibracinis koeficientas | Dozometro numeris | Kalibracinis koeficientas |
|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| 1 | 1,11 | 12 | 1,00 | 23 | 0,96 |
| 2 | 0,93 | 13 | 1,07 | 24 | 0,84 |
| 3 | 1,15 | 14 | 0,98 | 25 | 0,94 |
| 4 | 0,92 | 15 | 1,03 | 26 | 0,88 |
| 5 | 0,91 | 16 | 1,12 | 27 | 0,97 |
| 6 | 0,98 | 17 | 1,03 | 28 | 0,94 |
| 7 | 0,93 | 18 | 1,00 | 29 | 0,95 |
| 8 | 1,07 | 19 | 1,09 | 30 | 1,14 |
| 9 | 0,95 | 20 | 0,98 | 31 | 0,97 |
| 10 | 1,02 | 21 | 0,98 | 32 | 1,00 |
| 11 | 0,95 | 22 | 1,16 | 33 | 1,04 |

Grafiškai kalibraciniai koeficientai pavaizduoti 4.6 paveiksle.



4.6 pav. Antros grupės dozimetų (nuskaitytų funkcionalizuota sistema) kalibracinių koeficientų pasiskirstymas

Atliekant duomenų, gautų dozimetų nuskaitymą atlikus originalia bei funkcionalizuota matavimo sistema „RIALTO TLD“, palyginamąją analizę, apskaičiuoti kalibracinių koeficientų vidurkiai bei standartiniai nuokrypiai. Jie pateikiami 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė. „Pin worm“ dozimetų kalibracinių koeficientų vidurkis bei standartinis nuokrypis

| Dozimetų pavadinimas | Pirma grupė Originali sistema | Antra grupė Funkcionalizuota sistema |
|---|----------------------------------|---|
| Vidutinis kalibracinis koeficientas, sant.vnt. | 1,017 | 0,999 |
| Standartinis nuokrypis | 0,117 | 0,079 |

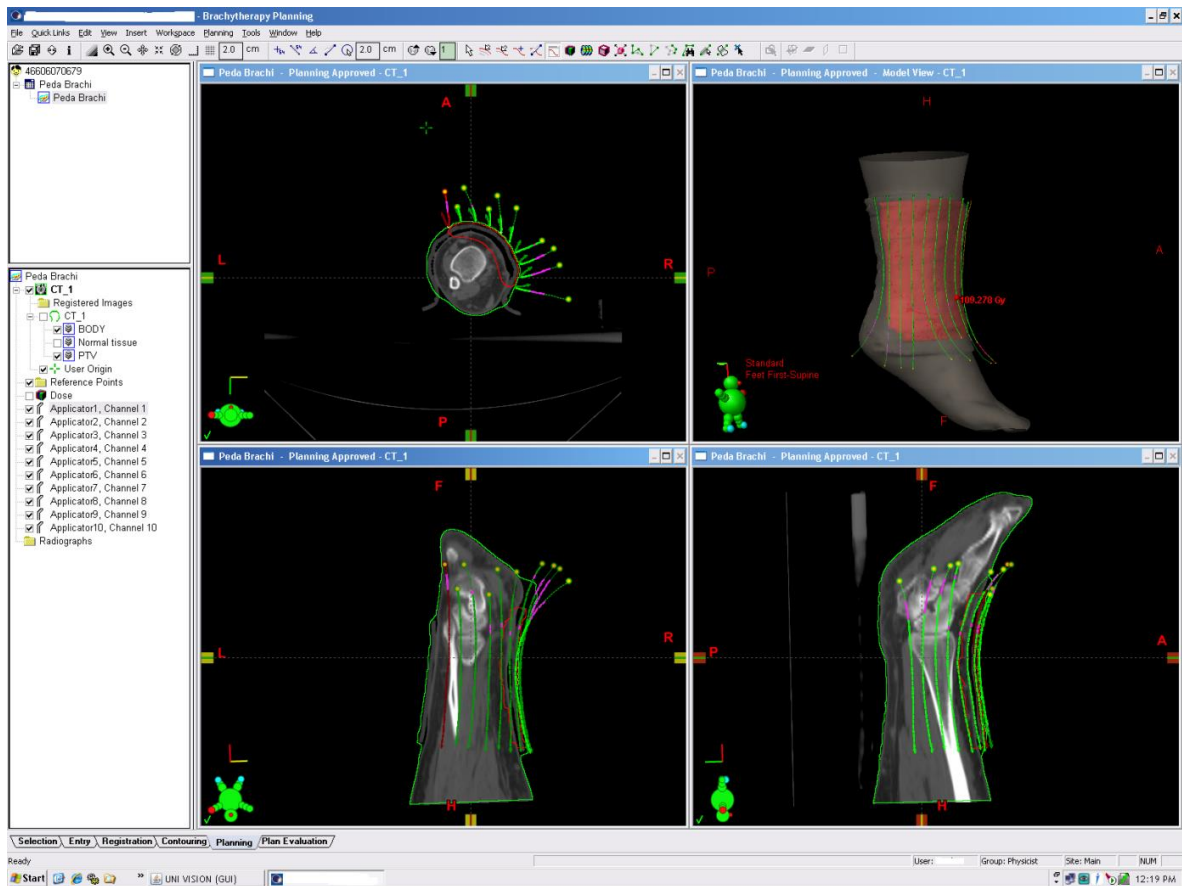
Originalia nuskaitymo sistema nuskaitytų „pin worm“ dozimetų kalibracinių koeficientų vidutinė vertė didesnė, nei dozimetų, nuskaitytų funkcionalizuota matavimo sistema. Dozimetų nuskaitytų originalia matavimo sistema kalibracinių koeficientų standartinis nuokrypis yra didesnis (0,117), nei dozimetų nuskaitytų funkcionalizuota sistema (0,079). Dozimetų, nuskaitytų funkcionalizuota matavimo sistema, tikslesnė vidutinė kalibracinių koeficientų vertė, bei mažesnis standartinis nuokrypis parodo, jog sistemos gaunamų rezultatų atsikartojamumas yra geresnis nei gaunamų originalia sistema. Nors gauti skirtumai atrodo nedideli, tačiau atliekant mažų dozių nuskaitymą, šie skirtumai tampa reikšmingais.

4.2.2. Įrangos funkcionalumo testavimas nustatant paciento dozes brachiterapijos procedūros metu

Funkcionalizuotos termoliuminescencinių dozimetų nuskaitymo sistemos „RIALTO TLD“ antrasis tyrimas, atliktas nuskaitant brachiterapijos procedūros metu apšvitintus termoliuminescencinius dozimetrus.

Brachiterapijos metu (4.7 pav.) „pin worm“ dozimetrai patalpinami vamzdelyje ir priklijuojami šalia gydomojo šeštojo vamzdelio lygiagrečiai jam ir į septintojo pusę. Lygiuojamas kartu su antruoju vamzdeliu. Tarpų tarp dozimetų nebuvo, pozicionavimas buvo vykdomas vienas greta kito.

Dozės įvertinimas taške atliktas „eclipse“ programoje parinkus „point dose“ funkciją. Dozometro padėtis atkurama remiantis atskaitos taškais (gydomaisiais vamzdeliais). Dozometro parodymai registruoti kiekvienoje rekonstruoto vaizdo pozicijoje. Iš trijų verčių vedamas vidurkis.



4.7 pav. Brachiterapijos procedūros modelis

Atlikus procedūrą dozimetrai susigražinami ir atliekamas jų nuskaitymas. Gauti duomenys palyginami su brachiterapijos procedūros modeliavimo sistemos apskaičiuotomis dozėmis [33].

Dozometro sugertosios jonizuojančiosios spinduliuotės dozės, dažniausiai apskaičiuojamos dviem metodais: skaičiuojant ketvirto bei penkto piko ribojamą plotą (dalis esanti po iššvyčio kreive) arba matuojant penkto piko intensyvumą (maksimalią reikšmę) [34].

Tyrimo metu dozimetų sugertosios dozės apskaičiuotos naudojantis maksimaliomis iššvyčio kreivių vertėmis.

Siekiant kokybiškai išmatuoti paciento patiriamą dozę brachiterapijos procedūros metu, prieš tai atlikta dozimetų kalibracija. Kalibracijos metu dozimetrai apšvitinti 5 Gy doze. Spinduliuotės lauko parametrai 10 cm x 10 cm, atstumas nuo šaltinio iki dozimetų – vienas metras. Atsižvelgus į šaltinio aktyvumą tą dieną, švitinimo trukmė apskaičiuota ir pateikta 4.5 lentelėje.

4.5 lentelė. Kalibracinio šaltinio parametrai

| Šaltinio kalibravimo data | Kalibravimo galingumas, Gy/min | Apšvitinimo data | Dienų sk. po kalibravimo | Skilimo koeficientas | Galingumas, Gy/min | Švitinimo trukmė, s (5 Gy) |
|---------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------|----------------------|--------------------|----------------------------|
| 2014-01-21 | 0,1994 | 2015-05-08 | 472 | 0,8437 | 0,1683 | 1733 |

Laikantis termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo įrangos gamintojų rekomendacijų, matavimai atlikti tamsioje patalpoje. Nuskaitymo įrenginys RIALTO įjungtas 15-30 min. prieš atliekant dozimetų nuskaitymą (laikas, per kurį sistema pasiekia darbinę temperatūrą).

Atliktas kalibracine doze apšvitintų TL dozimetų nuskaitymas funkcionalizuotu RIALTO įrenginiu. Po nuskaitymo dozimetrai pakartotinai atkaitinti siekiant ištrinti likutinę informaciją ir taip paruošti naujiems matavimams. Pakartotinai atkaitinti dozimetrai naudoti nustatant brachiterapijos procedūros metu paciento gaunamą dozę. Procedūros metu dozimetrai patalpinami šalia jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinių. Po procedūros dozimetrai buvo gražinti nuskaitymui. Nuskaitymo metu naudoti termoluminescencinių dozimetų nuskaitymo sistemos „RIALTO TLD“ parametrai pateikti 3.1 lentelėje. Užregistruojami gauti duomenys (impulsų skaičius). Jie koreguoti pagal 12 formulę ir gaunamas pakoreguotas impulsų skaičius kiekvienam detektoriumi. Iš koreguoto impulsų skaičiaus, naudojantis 13 formule, apskaičiuojamos dozimetromi sukauptos dozės.

Registruojamų impulsų skaičius priklauso nuo spinduliuotės energijos, todėl jei dozimetrai kalibruoti vienokios energijos spinduliuote, o tyrimo metu naudota kitos energijos spinduliuotė, skaičiuojant dozes būtina pritaikyti dozių konversijos koeficientą.

Šio tyrimo metu termoluminescenciniai dozimetrai kalibruoti apšvitinus juos ^{60}Co šaltiniu, o brachiterapijos procedūros metu naudotas ^{192}Ir šaltinis, todėl būtina taikyti dozių konversijos koeficientą. Literatūroje pateikiamas dozės konversijos koeficientas – 1,035 [35].

Išmatuotas dozimetų impulsų skaičius, apskaičiuoti kalibraciniai koeficientai, pakoreguoti impulsai, apskaičiuotos dozės bei pritaikius konversijos koeficientą perskaičiuotos dozės pateikiamos 4.6 lentelėje.

4.6 lentelė. Brachiterapijos procedūros metu užregistruotų impulsų ir dozių skaičiavimai

| Kalibracinė dozė, Gy | | | | | | |
|--|------------------|--------------------------------------|------|-----------------------------|--------------------|-------------------|
| | | 5 | | | | |
| Konversijos iš Co-60 į Ir-192 koeficientas | | 1,035 | | | | |
| Dozimetro numeris | Impulsų skaičius | Impulsai apšvitinus kalibracine doze | DKK | Koreguotas impulsų skaičius | Išmatuota dozė, Gy | Iš Co-60 į Ir-192 |
| 5 | 139270 | 83810 | 1,23 | 171836 | 8,31 | 8,60 |
| 6 | 138040 | 91350 | 1,13 | 156260 | 7,56 | 7,82 |
| 7 | 137220 | 107310 | 0,96 | 132230 | 6,39 | 6,62 |
| 8 | 124360 | 89190 | 1,16 | 144184 | 6,97 | 7,22 |
| 9 | 129460 | 111310 | 0,93 | 120269 | 5,82 | 6,02 |
| 10 | 129350 | 111930 | 0,92 | 119501 | 5,78 | 5,98 |
| 11 | 125570 | 109130 | 0,95 | 118986 | 5,75 | 5,95 |
| 12 | 161130 | 114710 | 0,90 | 145254 | 7,02 | 7,27 |
| 13 | 132910 | 107620 | 0,96 | 127708 | 6,17 | 6,39 |
| 14 | 119150 | 102910 | 1,01 | 119726 | 5,79 | 5,99 |
| 15 | 143890 | 120040 | 0,86 | 123953 | 5,99 | 6,20 |
| 16 | 118760 | 90350 | 1,15 | 135924 | 6,57 | 6,80 |
| 18 | 130160 | 97190 | 1,06 | 138487 | 6,70 | 6,93 |
| 19 | 143770 | 97820 | 1,06 | 151982 | 7,35 | 7,61 |
| 20 | 136720 | 98090 | 1,05 | 144132 | 6,97 | 7,21 |
| 21 | 201910 | 100410 | 1,03 | 207938 | 10,05 | 10,41 |
| 22 | 141870 | 113280 | 0,91 | 129506 | 6,26 | 6,48 |
| 23 | 114200 | 117360 | 0,88 | 100623 | 4,87 | 5,04 |
| 25 | 122310 | 98810 | 1,05 | 128001 | 6,19 | 6,41 |
| 26 | 131790 | 98680 | 1,05 | 138104 | 6,68 | 6,91 |
| 27 | 98100 | 95000 | 1,09 | 106782 | 5,16 | 5,34 |
| 28 | 150260 | 104890 | 0,99 | 148136 | 7,16 | 7,41 |
| 29 | 112530 | 98210 | 1,05 | 118486 | 5,73 | 5,93 |
| 31 | 123460 | 126620 | 0,82 | 100827 | 4,88 | 5,05 |
| 32 | 118800 | 102000 | 1,01 | 120439 | 5,82 | 6,03 |
| 33 | 100480 | 105610 | 0,98 | 98385 | 4,76 | 4,92 |
| 34 | 112740 | 113610 | 0,91 | 102616 | 4,96 | 5,14 |
| 35 | 135860 | 103530 | 1,00 | 135699 | 6,56 | 6,79 |
| 36 | 146850 | 96110 | 1,08 | 158000 | 7,64 | 7,91 |
| 38 | 164960 | 117980 | 0,88 | 144585 | 6,99 | 7,24 |

Gautos dozės palygintos su brachiterapijos procedūros planavimo sistemos nurodytomis dozėmis. Apskaičiuota santykinė neapibrėžtis (4.7 lent.).

4.7 lentelė. Išmatuotos, planavimo sistemos apskaičiuotos dozės bei santykinė neapibrėžtis

| Dozometro numeris | Išmatuota dozė, Gy | Planavimo sistemos apskaičiuota dozė, Gy | Neapibrėžtis, % | Dozometro numeris | Išmatuota dozė, Gy | Planavimo sistemos apskaičiuota dozė, Gy | Neapibrėžtis, % |
|-------------------|--------------------|--|-----------------|-------------------|--------------------|--|-----------------|
| 5 | 8,60 | 10,21 | 15,80 | 21 | 10,41 | 7,54 | 38,00 |
| 6 | 7,82 | 8,37 | 6,53 | 22 | 6,48 | 7,58 | 14,53 |
| 7 | 6,62 | 7,31 | 9,44 | 23 | 5,04 | 6,06 | 16,88 |
| 8 | 7,22 | 7,20 | 0,35 | 25 | 6,41 | 7,36 | 12,87 |
| 9 | 6,02 | 6,71 | 10,26 | 26 | 6,91 | 7,04 | 1,88 |
| 10 | 5,98 | 6,56 | 8,83 | 27 | 5,34 | 6,70 | 20,27 |
| 11 | 5,95 | 6,18 | 3,77 | 28 | 7,41 | 6,52 | 13,59 |
| 12 | 7,27 | 7,88 | 7,71 | 29 | 5,93 | 6,67 | 11,07 |
| 13 | 6,39 | 7,71 | 17,11 | 31 | 5,05 | 6,93 | 27,17 |
| 14 | 5,99 | 5,84 | 2,59 | 32 | 6,03 | 6,85 | 11,97 |
| 15 | 6,20 | 6,29 | 1,44 | 33 | 4,92 | 5,97 | 17,56 |
| 16 | 6,80 | 7,69 | 11,53 | 34 | 5,14 | 8,32 | 38,22 |
| 18 | 6,93 | 7,33 | 5,44 | 35 | 6,79 | 7,73 | 12,12 |
| 19 | 7,61 | 7,59 | 0,33 | 36 | 7,91 | 7,23 | 9,43 |
| 20 | 7,21 | 7,91 | 8,87 | 38 | 7,24 | 9,19 | 21,22 |

Mažiausi ir didžiausi nuokrypiai į teigiamą ir neigiamą pusę bei vidutinis nuokrypis pateikti 4.8 lentelėje.

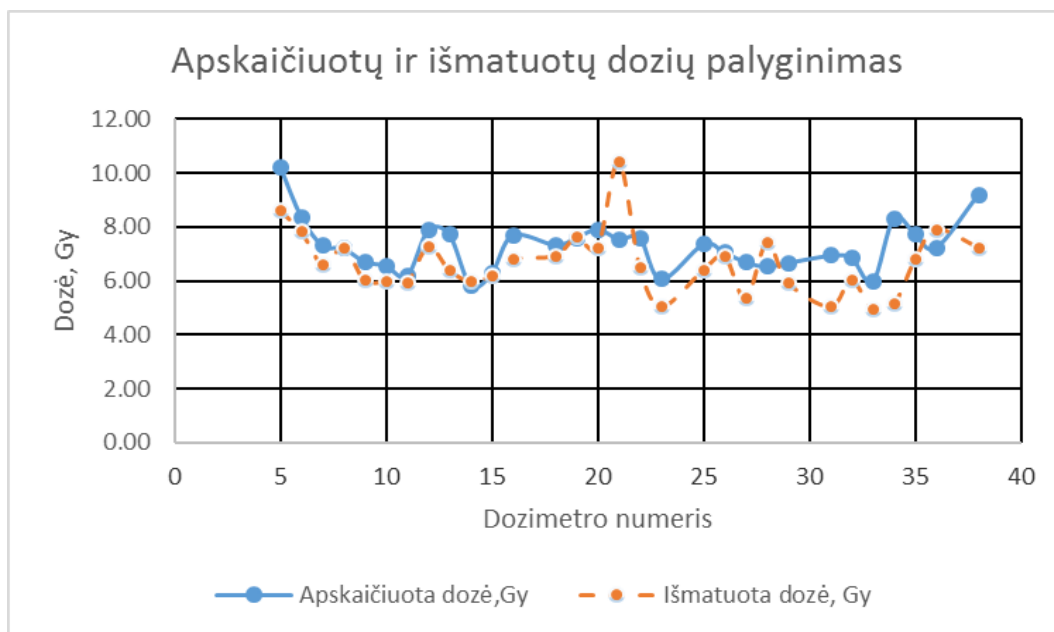
4.8 lentelė. Maksimalus, minimalus bei vidutinis dozės nuokrypis

| Mažiausias nuokrypis į mažesnę pusę, % | Didžiausias nuokrypis į mažesnę pusę, % | Mažiausias nuokrypis į didesnę pusę, % | Didžiausias nuokrypis į didesnę pusę, % | Vidutinis nuokrypis, % |
|--|---|--|---|------------------------|
| 1,44 | 38,22 | 0,33 | 38,00 | 12,26 |

Apskaičiuotų bei išmatuotų dozių palyginimas pateikiamas grafiškais (4.8 pav.).

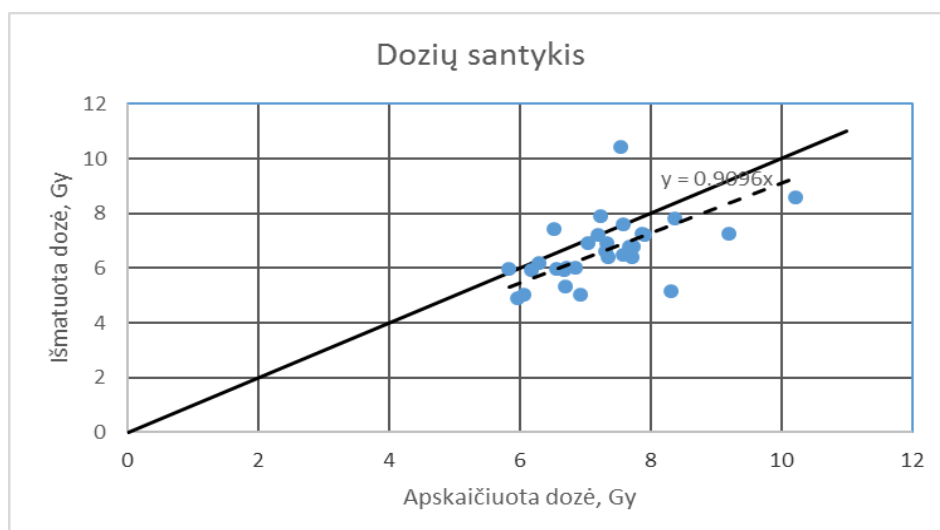
Pagal Tarptautinės atominės energijos agentūros (TATENA) rekomendacijas, išmatuotos dozės vertės nuokrypis nuo tikrosios vertės negali būti didesnis nei 1,5 karto, t.y. 33 proc. nuokrypis į mažesniąją pusę ir 50 proc. nuokrypis – į didesniąją [36].

Atlikus gautų duomenų analizę nustatyta, kad vidutinė matavimo neapibrėžtis yra 12,26 proc.. Vieno matavimo paklaida į mažesniąją pusę viršija rekomenduojamą 33 proc. lygį ir siekia daugiau nei 38%. Būtina įvertinti tai, jog rezultatų tikslumą įtakoja dozimetų pozicionavimo tikslumas brachiterapijos procedūros metu, todėl šį matavimo rezultatą galima laikyti netinkamo pozicionavimo pasekme. Į didesniąją pusę maksimalūs nuokrypiai neviršija rekomenduojamo lygio.



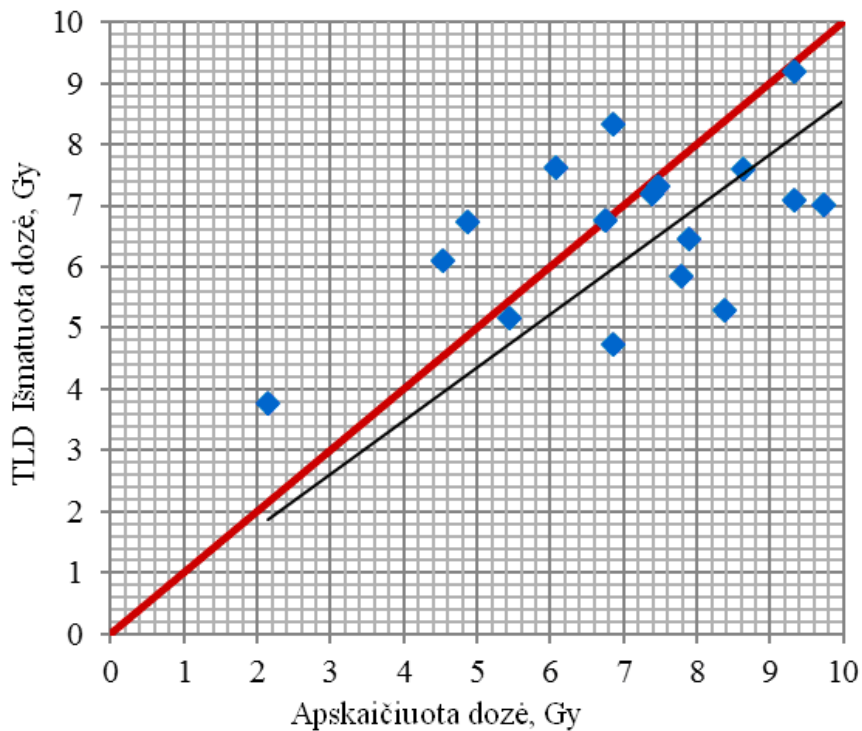
4.8 pav. Apskaičiuotų ir išmatuotų dozių palyginimas

Aiškesniam termoluminescencinių dozimetų, nuskaitytų funkcionalizuota dozimetų nuskaitymo sistema ir brachiterapijos procedūros planavimo sistemos apskaičiuotų dozių nuokrypių įvertinimui jie pavaizduoti grafiškai (4.9 pav.). Grafike abscisių ašyje atidėtos brachiterapijos procedūros planavimo sistemos apskaičiuotos dozės, o vertikalioje ašyje – TLD užregistruotos dozės. Kuomet nuokrypių nėra (jie lygūs 0), taškai išsidėsto tiesėje $x=y$.



4.9 pav. Išmatuotų bei planavimo sistemoje apskaičiuotų dozių palyginimas (nuskaitymas vykdytas funkcionalizuotu TLD skaitytuvu)

Grafike matyti, kad taškai išsidėsto aplink tiesę $y=0.9096x$, kuri yra labai artima tiesei be nuokrypių ($y=x$). Matyti, kad nuokrypiai yra maži, kai dozės galia neviršija **8 Gy**. Didesnės dozės registruojamos esant labai mažam atstumui iki šaltinio, kur matavimo rezultatus stipriai įtakoja pozicionavimo tikslumas (dėl didelių dozės gradientų).



4.10 pav. Išmatuotų bei planavimo sistemoje apskaičiuotų dozių palyginimas (nuskaitymas vykdytas originaliu TLD skaitytuvu)

Analogiškai lyginant apskaičiuotas dozes, kuomet dozimetrai nuskaityti su originaliu „RIALTO TLD“ skaitytuvu, dozių palyginimas pateikiamas (4.10 pav.). Matyti, kad taškai išsidėsto plačiau nuo tiesės, atitinkančią nulinį nuokrypį.

Galima daryti išvadą, kad matavimo rezultatai, gauti dozimetrus nuskaitant funkcionalizuota matavimo sistema „RIALTO TLD“ yra tikslesni, nei gauti nuskaitymą atliekant originalia nuskaitymo sistema.

IŠVADOS

1. Atliktus „RIALTO TLD“ termoliuminescencinių dozimetų nuskaitymo sistemos funkcionalizavimą nestandartinių dozimetų nuskaitymui plačiame dozių intervale, suprojektuotas ir įmontuotas naujas atmintinės blokas, leidžiantis sumažinti nuskaitymo sistemoje susidarančius elektromagnetinius triukšmus, pagerinantis signalas-triukšmas santykį, paspartinantis duomenų nuskaitymo ir įrašymo procesą, sumažinantis akustinį triukšmą. Atmintinėje galima saugoti šimtus kartų didesnę duomenų kiekį, nei prieš tai buvusioje laikmenoje, taip pat duomenis galima perkelti į asmeninį kompiuterį ir atlikti išsamią jų analizę. Vertinant funkcionalizuotą nuskaitymo sistemą metrologiniu požiūriu, nustatyta ~15% neapibrėžtis, kuri yra mažesnė už TATENA rekomenduojamą 20% neapibrėžties vertę. Atliktus „pinworm“ termoliuminescencinių dozimetų, apšvitintų 5 Gy doze, kalibraciją, buvo apskaičiuoti kalibraciniai koeficientai, atliktas rezultatų, gautų naudojant originalią dozimetų nuskaitymo RIALTO TLD sistemą, bei funkcionalizuotą nuskaitymo įrenginį palyginimas. Atlikus nuskaitymą originalia sistema, apskaičiuota vidutinė kalibracinių koeficientų vertė yra 1,017, o standartinis nuokrypis 0,117. Atlikus „pinworm“ dozimetų nuskaitymą su funkcionalizuotu „RIALTO TLD“ skaitytuvu, užfiksuoti tikslesni duomenys – vidutinė kalibracinių koeficientų vertė 0,999, o standartinis nuokrypis – 0,079. Didesnis registruojamų duomenų tikslumas ir atsikartojamumas stebimas dozimetų grupėje, kurios nuskaitymas atliktas su funkcionalizuota „RIALTO TLD“ sistema.

2. Funkcionalizuota matavimo sistema „RIALTO TLD“ buvo testuojama registruojant pacientų dozes brachiterapijos procedūros metu. Konvertuojant užregistruotus impulsus į dozę, buvo atsižvelgta į faktą, jog kalibracija atlikta su Co-60 šaltiniu, o brachiterapijos procedūroje naudotas Ir-192 šaltinis, todėl skaičiuojant dozes pritaikytas dozės konversijos koeficientas. Atliktas išmatuotų bei brachiterapijos procedūros planavimo sistemos apskaičiuotų dozių palyginimas. Gauta vidutinė neapibrėžtis yra 12,26%. TATENOS rekomenduojama 33% neapibrėžtis nėra viršyta.

Gauti rezultatai leidžia daryti prielaidą, jog funkcionalizuota termoliuminescencinių dozimetų nuskaitymo sistemą „RIALTO TLD“ gali būti naudojama nuskaitant nestandartinius termoliuminescencinius dozimetrus.

ŠALTINIAI

1. Knoll, G.F., *Radiation detection and measurement*. 2010, United States of America.
2. Niewiadomski, T., *25 Years of TL Dosimetry at the Institute of Nuclear Physics*. 1996, Krokuva.
3. Bilski, P.O., P. Burgkhardt, B. Piesch, E., *Ultra-Thin LiF:Mg, Cu, P Detectors for Beta Dosimetry*. 1995.
4. H.S. Virk, S.K.O., *Synthesis and Characterization of Phosphors for TL Dosimetry*. 2014.
5. Katzir, A. and O. Gayer, *Thermoluminescence measurements and dosimetry with temperature control of the thermoluminescent element*. 2012, Google Patents.
6. Huston, A., B.L. Justus, and M. Moscovitch, *Laser-Heated Thermoluminescence Dosimeter*. 2013, Google Patents.
7. Alnor, *User manual of TLD Dosimetry system*. 1995.
8. Bilski, P., et al., *Dependence of the thermoluminescent high-temperature ratio (HTR) of LiF:Mg, Ti detectors on proton energy and dose*. *Radiation Measurements*, 2014. **71**: p. 39-42.
9. M. Noll, W.S., N. Vana, M. Fugger, E. Egger, *Correlation of LET-measurements using TLDs with biological effects in a proton beam of 62 MeV in International Atomic Energy Agency conference*.
10. Sibony, D., Y. Horowitz, and L. Oster, *The effect of sample/planchet geometry and temperature resolution on the reproducibility of glow curve shapes and precision of dose measurement in LiF-TLD-100 thermoluminescent dosimetry*. *Radiation Measurements*, 2014. **71**: p. 205-207.
11. Diana Adlienė, G.A., *Spinduliuotės detektoriai*. Vol. 1. 2011, Kaunas: KTU leidykla "Technologija".
12. Technology, N., *OPERATORS MANUAL for RIALTO*. 1993, Berkshire, England.
13. Technology, N., *OPERATOR'S MANUAL for RIALTO TLD Reader and New TLD Standard version 2.00*. 1994, Berkshire, England.
14. Del Sol Fernández, S., et al., *Thermoluminescent characteristics of LiF:Mg, Cu, P and CaSO₄:Dy for low dose measurement*. *Applied Radiation and Isotopes*, 2016. **111**: p. 50-55.
15. Kafadar, V.E. and K.F. Majeed, *The effect of heating rate on the dose dependence and thermoluminescence characteristics of CaSO₄: Dy (TLD-900)*. *Thermochimica Acta*, 2014. **590**: p. 266-269.
16. Azorin Nieto, J., *Present status and future trends in the development of thermoluminescent materials*. *Applied Radiation and Isotopes*.
17. Yeh, D.M., T.H. Wang, and L.K. Pan, *Evaluating the quality characteristics of TLD-100T and TLD-100H exposed to diagnostic X-rays and 64 multislice CT using Taguchi's quality loss function*. *Radiation Measurements*, 2015. **80**: p. 17-22.
18. Boschung, M., Homsy, A., Joneja, O.P., Chawla, R., *Characterisation of MCP-7s material for use as a beta extremity dosimeter*. 2000.
19. Singh, M. and P.D. Sahare, *Redox reactions in Cu-activated nanocrystalline LiF TLD phosphor*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2012. **289**: p. 59-67.
20. Kortov, V. and Y. Ustyantsev, *Advantages and challenges of high-dose thermoluminescent detectors*. *Radiation Measurements*, 2013. **56**: p. 299-302.
21. Salah, N., Z.H. Khan, and S.S. Habib, *Copper activated LiF nanorods as TLD material for high exposures of gamma-rays*. *Nuclear Instruments and Methods in*

- Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2009. **267**(21–22): p. 3562-3565.
22. Horowitz, Y., *Microdosimetric response of physical and biological system to low- and High-LET radiations*. First ed. 2006, Amsterdam, The Netherlands: ELSEVIER. 489.
 23. Bruml, W., M. Moscovitch, and A. Szalanczy, *Thermoluminescence dosimetry card reader heating assembly*. 1989, Google Patents.
 24. M. Oberhofer, A.S., *Techniques and Management of Personnel Thermoluminescence Dosimetry Services*. 1993: Springer Science & Business Media.
 25. Cohen, I., et al., *Optimization of the temperature profiles due to a nitrogen jet impinging on a TLD detector*. Radiation Measurements, 2014. **70**: p. 48-51.
 26. Morkunas, G. and E. Makariūnienė, *Jonizuojančiosios spinduliuotės ir radiacinės saugos terminų žodynas*. 1999, Vilnius.
 27. TECHNOLOGIES, M., *RE-200 TLD Reader user manual*. 2009.
 28. Technology, N., *SERVICE MANUAL for RIALTO*. 1992, Berkshire, England.
 29. V., N., *Accuracy consideration in EPR dosimetry*. *App. Rad. Isot.* 52 (2000) 1039-1050.
 30. Das, R., Toye, W., Kron, T., Williams, S. and Dushesne, G., *Thermoluminescence dosimetry for in-vivo verification of high dose rate brachytherapy for prostate cancer*. *Australas Phys Eng Sci Med*, 2008. **30**: p. 178-184.
 31. Davis S.D., R.C.K., Mobit P.N., Van der Zwan L., Chase W.J., Shortt K., *The response of LiF thermoluminescence dosimeters to photon beams in the energy range from 30 kV X rays to 60Co gamma rays*. *Radiat. Prot. Dosim.*, 2003. **106**: p. 33-43.
 32. Rivard MJ, C.B., DeWerdLA, Hanson WF, Huq MS, Ibbott GS, Mitch MG, Nath R, Williamson JF, *Update of AAPM Task Group No. 43 Report: a Revised AAPM Protocol for Brachytherapy Dose Calculations*. *Med Phys* 2004. **31**633-674.
 33. DeWerd, L.A., et al., *The use of TLDs for brachytherapy dosimetry*. *Radiation Measurements*, 2014. **71**: p. 276-281.
 34. Oliveira, F.F., et al., *Treatment verification and in vivo dosimetry for total body irradiation using thermoluminescent and semiconductor detectors*. *Radiation Measurements*, 2014. **71**: p. 374-378.
 35. Hasin A. Azhari, F.H., Wilhelm Schütte, and Golam A. Zakaria, *Dosimetric verification of source strength for HDR afterloading units with Ir-192 and Co-60 photon sources: Comparison of three different international protocols*. 2012.
 36. A. Urbelis, D.A., V. Arkočius, J. Augulis, B.Gricienė, K. Juškevičius, G. Klevinskas, R. Kranevičius, R. Ladygienė, R. Lekevičius, A. Mastauskas, G. Morkūnas, V. Paulavičius, P. Pipinis, R. M. Stasiūnaitienė, D. Šidiškienė, K. Zemkajus, *Radiacija: sauga, sveikata, ekologija*. 2004.
 37. Hood, C., Duggan, L., Bazley, S., Denham, J., Budzanowski, M. and Kron, T. LiF: Mg,Cu,P ‘Pin worms’: miniature detectors for brachytherapy dosimetry. *Radiat. Prot. Dosimetry* 101(1–4), 407–410 (2002)

Keitiklio principinė schema

