

Odziv termoluminiscentnih dozimetara u snopu iona litija

Mercedes Horvat*

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

(Dated: 22. siječnja 2023.)

Proučavan je odziv jedne od vrsta termoluminiscentnih (TL) dozimetara na bazi litij fluorida, LiF:Mg,Ti (TLD-700). Dozimetri su ozračeni u polju gama zračenja ^{60}Co i ^{137}Cs u sekundarnom standardnom dozimetrijskom laboratoriju (SSDL) te u snopu iona H^+ energije 2 MeV i $^7\text{Li}^{+3}$ energije 12 MeV na Tandem Van de Graff akceleratoru Instituta Ruđer Bošković. Ispitana je uloga predgrijavanja u očitavanju signala dozimetra te je utvrđeno da je $100^\circ\text{C}/20\text{min}$ prikladno predgrijavanje za eliminaciju niskotemperaturnih vrhova u krivulji isijavanja. Utvrđeno je da se za fotonska zračenja TLD-ova u krivulji isijavanja nalazi jasan dozimetrijski vrh te da očitani TL signal raste s porastom doze. Pokazano je da je ovisnost TL signala o apsorbiranoj dozi linearna za raspon apsorbiranih doza od 0.09 do 0.92 Gy, pri čemu su doze izažene kao doze u LiF. U krivuljama isijavanja TLD-ova ozračenih H^+ i ^7Li ionima uočeno je da je signal odrezan odnosno da je maksimalna temperatura očitavanja od 270°C preniska da bi uhvatila potencijalne visokotemperaturne vrhove. Izvršena su nova mjerenja u snopu H^+ energije 2 MeV sa maksimalnom temperaturom zagrijavanja pri očitavanju od 350°C te su uočeni visokotemperaturni vrhovi. Kako bi se potvrdila pretpostavka da isti postoje i za ^7Li potrebno je napraviti nova mjerenja što je idući korak u istraživanju.

I. UVOD

I.1. Uvod u dozimetriju

Dozimetrija se bavi metodama mjerenja energije apsorbirane u jedinici mase sredstva prolaskom direktnog ili indirektnog ionizirajućeg zračenja.[1] Ionizirajuće zračenje je ono koje može ionizirati materiju te pod direktno spadaju nabijene čestice kao elektroni, protoni ili teži ion. Oni energiju materiji predaju kroz meke i tvrde sudare sa atomima materije kroz koju prolaze, gdje Coulombskim međudjeluju s orbitalnim elektronima. Pod indirektno ionizirajuće zračenje spadaju neutralne čestice kao neutroni ili gama, X i visokoenergetski UV fotoni. Kod indirektnog zračenja energija se prvo prenosi na oslobođenu nabijenu česticu, najčešće oslobođeni orbitalni elektron. On zatim Coulombskim međudjelovanjem deponira energiju u sredstvu.

Postoji nekoliko dozimetrijskih veličina kojima se mjere prijenosi energije. Jedna od njih je Kerma (Kinetic Energy Released per unit Mass) koja se definira za indirektno ionizirajuće zračenje kao srednja energija prenesena (E_{tr}) direktnom ionizirajućem zračenju po jedinici mase sredstva

$$K = \frac{d\overline{E}_{\text{tr}}}{dm} \quad \left[Gy = \frac{J}{kg} \right] \quad (1)$$

Obzirom na udjele daljnjih međudjelovanja nastalog direktnog zračenja sa materijom, kerma se može podijeliti na sudarnu i radijativnu. Sudarna kerma je dio energije prenesena po jedinici mase sredstva na direktno ionizirajuće zračenje koje tu energiju deponira u sredstvo kroz meke i tvrde sudare. Ona se može izračunati kao

umnožak toka fotona Ψ i masenog apsorpcijskog koeficijenta $\frac{\mu_{\text{ab}}}{\rho}$. Za razliku od toga, radijativna kerma je udio energije po masi sredstva prenesena direktnom zračenju koji istu gubi radijativnim putem bez pohranjivanja u sredstvo.

U slučaju kada se u sredstvu, zračenom indirektnim zračenjem, postigne ravnoteža nabijenih čestica (eng. Charged Particle Equilibrium, CPE)¹, sudarna kerma može se izjednačiti sa drugom važnom dozimetrijskom veličinom, apsorbiranom dozom D

$$D = K_c = \Psi \left(\frac{\mu_{\text{ab}}}{\rho} \right) \quad (2)$$

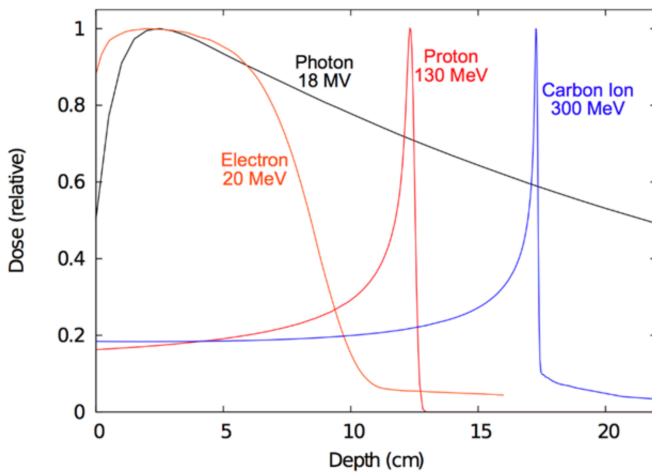
Apsorbirana doza (često samo doza) je veličina primjenjiva i na direktno i na indirektno ionizirajuće zračenje, a predstavlja srednju apsorbiranu energiju (E_{ab}) po jedinici mase sredstva

$$D = \frac{d\overline{E}_{\text{ab}}}{dm} = \Phi \left(\frac{S}{\rho} \right)_c \quad \left[Gy = \frac{J}{kg} \right] \quad (3)$$

Ona se može dobiti kao umnožak toka nabijenih čestica Φ i masene sudarne zaustavne snage $\left(\frac{S}{\rho} \right)_c$. Sudarna zaustavna snaga je srednja kinetička energija koju nabijena čestica gubi po jedinici puta kroz određeno sredstvo. No ta energija nije nužno u potpunosti lokalno apsorbirana. U tvrdim sudarim može doći do izbijanja delta elektrona dovoljno velike energije da mogu izaći iz promatranog volumena, sa sobom noseći dio energije koju je čestica direktnog zračenja izgubila. Stoga se u dozimetriji koristi veličina definirana kao linearni prijenos energije (eng. Linear Energy Transfer, LET). Ona odgovara energiji lokalno apsorbiranoj u sredstvu po jedinici pređenog puta čestice direktnog zračenja.

* mercedes.horvat@student.pmf.hr

¹ U relevantno malom volumenu svaka nabijena čestica koja izađe iz volumena nadomještena je nabijenom česticom istog tipa i energije koja ulazi u taj volumen



Slika 1: Raspodjela doze po dubini u vodi za snopove fotona, elektrona, protona i ions ugljika. Fotoni najveću dozu deponiraju na početku dok nabijene čestice teže od elektrona, u ovom primjeru protoni i ioni ugljika, većinu doze deponiraju na kraju dosega. Preuzeto iz [2]

Kako indirektno i direktno zračenje različito međudjeluju s materijom, njihove raspodjele doze u materiji se također razlikuju. Raspodjela udjela doze po dubini prikazuje se u PDD krivulji (eng. Percentage Depth Dose curve) prikazanoj na slici 1. Općenito, nabijene čestice teže od elektrona deponiraju najveći udio svoje energije na samom kraju dosega u sredstvu što je vidljivo u PDD krivulji kao izrazit vrh zvan Bragov vrh. Fotoni pak najveću dozu ispostavljaju na početku te se doza smanjuje kako se ide dublje u sredstvo.

Za mjerenje dozimetrijskih veličina, direktno ili indirektno, služe dozimetri. Dozimetar zajedno sa čitačem čini dozimetrijski sustav. Poželjno je da odziv dozimetra bude linearan s dozom za veliki raspon doza te da ne ovisi o brzini doze kao ni o energiji ni smjeru zračenja. Ovisno o uvjetima zračenja i visini doze, ali i praktičnosti, bira se tip dozimetra. Mjerenjem jedne od dozimetrijskih veličina mogu se izračunati i ostale. Također, mjerenjem dozimetrijske veličine u jednom sredstvu, mogu se izračunati vrijednosti u drugim sredstvima.

I.2. Termoluminiscentna dozimetrija

Termoluminiscencija (TL) vrsta je fosforescencije² koja se stimulira zagrijavanjem. Termoluminiscentni ma-

terijali mogu se koristiti kao dozimetri (TLD, Termoluminiscentni dozimetri). Radi se o materijalima koji u kristalnoj strukturi imaju nepravilnosti u vidu dopanada koji stvaraju stabilna stanja unutar energetskog procjepa između valentne i vodljive vrpce. Ta stanja su zamke za elektrone (ili šupljine) jer kada elektron padne u to stanje, mala je vjerojatnost da će izaći bez termalne pobude. Princip rada TLD shematski je prikazan na slici 2. Kada je TLD ozračen ionizirajućim zračenjem, elektroni mogu prijeći iz valentne u vodljivu vrpcu. Neki od njih se ne relaksiraju nazad u valentnu vrpcu već u elektronsku zamku dopanda. Time je u TLD-u pohranjena informacija o zračenju. TLD-ovi su pasivni dozimetri te ih je nakon ozračivanja potrebno očitati. Kako bi se očitani isti se zagrijavaju na temperature koje odgovaraju energijama potrebnim za prijelaz elektrona iz stabilne zamke u vodljivu vrpcu. Elektroni iz vodljive vrpce se zatim rekombiniraju sa šupljinama koje su iza njih ostale u valentnoj vrpci. Njihovom rekombinacijom se emitira svjetlost čiji intenzitet predstavlja TL signal.

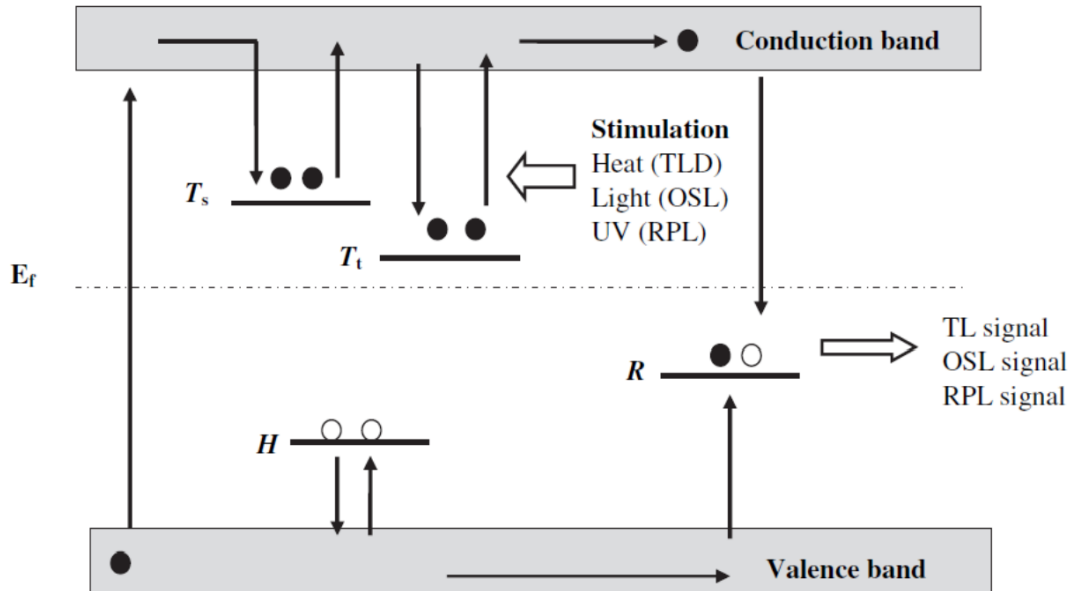
Prikaz mjerenog TL signala u vremenu ili u ovisnosti o temperaturi zagrijavanja, zove se krivulja isijavanja (eng. Glow curve). Primjer krivulje isijavanja za tip TLD 100³ dan je na slici 3. Površina ispod dozimetrijskog vrha u krivulji isijavanja proporcionalna je apsorbiranoj dozi. Za određivanje apsorbirane doze TLD-ovi se moraju kalibrirati u poznatom polju zračenja. Kalibracija se obično radi na signal glavnog dozimetrijskog vrha.

Općenito, TL materijali imaju više vrsta zamki odnosno više različitih stabilnih stanja koje su karakterizirani "dubinom" spram vodljive vrpce⁴. Također, za različite TL materijale energije tih stanja su različite. Kada se gleda konkretan TLD, koliko različitih tipova zamki posjeduje toliko vrhova signala postoji u njegovoj krivulji isijavanja. Dublja stanja će biti realizirana kao vrhovi na višim temperaturama. Isto tako postoje zamke odnosno stanja koja su nestabilna. Vrhovi u krivulji isijavanja koji odgovaraju nestabilnim stanjima nalaze se na nižim temperaturama. Ta stanja se prazne i bez vanjske pobude što se u krivulji isijavanja očituje kao smanjenje visine tih vrhova. Zbog velike promjenjivosti niskotemperaturnih vrhova u vremenu, taj dio signala se u praksi briše predgrijavanjem dozimetra prije samog očitavanja. TLD-ovi se mogu očitati samo jednom, obzirom da se procesom očitavanja briše pohranjena informacija.

² Prethodno ozračen materijal, nakon određenog vremenskog intervala, emitira svjetlost. Ta pojava naziva se luminiscencijom te ovisno o duljini vremenskog intervala između ozračivanja i emisije dijeli se u dvije kategorije, fluorescencija i fosforescencija. Kod fluorescencije taj interval je između 10^{-10} i 10^{-8} s dok kod fosforescencije vremenski interval je dulji od 10^{-8} s. Fosforescencija se može ubrzati pobuđivanjem npr svjetlošću ili zagrijavanjem.

³ TLD 100 (LiF:Mg,Ti) je dozimetar na bazi litij fluorida sa udjelima litija 7.5% ⁶Li, 92.5% ⁷Li i primjesama magnezija i titanija.

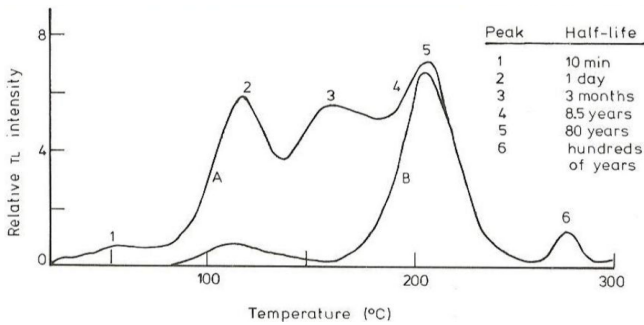
⁴ Ili valentne vrpce kada su u pitanju zamke za šupljine



Slika 2: Osnovni princip rada luminiscentnih dozimetara. Elektron se pobuđuje ionizirajućim zračenjem i prelazi iz valentne vrpce u vodljivu. U valentnoj vrpici ostaje šupljina koja se zarobi u zamci za šupljine H. Elektron upada u elektronsku zamku T. T_s predstavlja nestabilnu zamku iz koje elektron s velikom vjerojtanosti može izaći bez vanjske pobude. T_t predstavlja stabilnu zamku za elektrone, te za izlazak iz tog stanja potrebna je vanjska pobuda.

Za potrebe očitavanja, ovisno o vrsti materijala dozimetra, isti se stimuliraju zagrijavanjem (TLD), vidljivom svjetlosti (OSLD) ili ultraljubičastim zračenjem (RPLD). Vanjskom pobudom elektroni iz zamki prelaze u vodljivu vrpce te se rekombiniraju sa šupljinama u rekombinacijskim centrima R. Time se emitira svjetlost koja se mjeri.

Preuzeto iz [3].



Slika 3: Primjer krivulje isijavanja za TLD 100. Može se razaznati 6 vrhova u rasponu temperatura od 0 do 300°C. Također je prikazan utjecaj aniliranja na izgled krivulje, gdje je za A provedeno aniliranje 400°C/1h dok je za B provedeno aniliranje 80°C/16h prije ozračivanja. Dana su vremena poluživota (eng. Half-life) za svaki vrh iz kojih se vidi kako se niskotemperaturni vrhovi prazne u relativno kratkom roku. Preuzeto iz [4].

Mjerni ciklus očitavanja svakog TLD-a sastoji se od nekoliko koraka. Aniliranje prije ozračivanja kako bi se izbrisao zaostao signal prijašnjih zračenja nakon čega se TLD može ozračiti. Prije očitavanja radi se predgrijavanjem te zatim i samo očitavanje. Konkretna specifikacije

mjernog ciklusa u vidu temperatura, stopa zagrijavanja i hlađenja kao i vrijeme trajanja za aniliranje, predgrijavanje i očitavanje će ovisiti o konkretnom materijalu TLD-a.

Dodatno, TLD-ovi istog sastava zračeni u istim uvjetima imati će različite jačine signala ovisno o njihovoj osjetljivosti. Na osjetljivost TLD-a mogu utjecati, između ostalog, oštećenja na površini kao i prijašnja zračenja i zagrijavanja[4]. Stoga je prije upotrebe za svaki dozimetar potrebno odrediti njegovu individualnu osjetljivost ϕ . Ona se standardno određuje kao omjer srednje vrijednosti očitano odgovora svih dozimetara i odgovora danog dozimetra

$$\phi_i = \frac{\bar{I}}{I_i} \quad (4)$$

Česta izvedba TLD je na bazi litij fluorida sa raznim primjesama npr LiF:Mg,Cu,P ili LiF:Mg,Ti, čiji se odziv istražuje u ovom radu. Litij fluorid TLD su često korišteni obzirom da su tkivu ekvivalentni. No, postoje i mnogi drugi TL materijali kao CaF₂, Al₂O₃ i dr.

II. EKSPERIMENTALNA METODA

Za potrebe eksperimenta korišten je dozimetrijski sustav kojeg su činili TLD-700 dozimetri i čitač Toledo

654, Vinten. TLD-700 (LiF:Mg,Ti) je dozimetar na bazi litij fluorida obogaćenim sa ${}^7\text{Li}$ (99.99% ${}^7\text{Li}$, 0.01% ${}^6\text{Li}$) sa primjesama Mg^{2+} i Ti^{2+} . Oni su oblika diska promjera 4.5mm i debljine 0.89mm te gustoće 2.64 g/cm²[4]. Označeni su sa jedne strane te su ozračivani označenom stranom okrenutom prema snopu i očitavani sa označenom stranom okrenutom prema fotomultiplikatoru čitača.

II.1. Mjerni ciklus

Prije ozračivanja provodi se postupak aniliranja u peći na 400°C/1h + 100°C/2h kako bi se poništio zaostao signal. TLD-ovi se zatim ozrače. Prije očitavanja potrebno je predgrijavanje u peći na 100°/20min kako bi se eliminirali nestabilni niskotemperaturni vrhovi što dovodi do preciznijeg rezultata mjerenja. Očitavanje dozimetara vršilo se pomoću Toledo 654, Vinten čitača u kojem se nalazi grijač koji grije TLD i fotomultiplikator koji detektira svjetlost koju zagrijani TLD emitira. Za potrebe očitavanja TLD se zagrijava stopom od 10°C/s do maksimalne temperature od 270°C te se na maksimalnoj temperaturi drži 35s. Očitava se u atmosferi dušika kako bi se spriječila kemoluminiscencija⁵ od dozimetra i čitača. Čitač je spojen na računalo gdje se zapisuje rezultat mjerenja te se vrši i integracija signala glavnog dozimetrijskog vrha.

II.2. Zračenje

II.2.1. Zračenje u SSDL-u

Za potrebe određivanja individualne osjetljivosti pojedinačnog dozimetra isti su ozračeni u polju gama zračenja⁶ izvora ${}^{137}\text{Cs}$ u sekundarnom standardnom dozimetrijskom laboratoriju (SSDL) Instituta Ruđer Bošković, kermom u zraku od 5mGy. Svi su postavljeni u držač od pleksiglasa koji je zaljepljen na kocku stiropora te postavljen na 1 metar od izvora. Na toj udaljenosti se tokom zračenja očekuje brzina kerme u zraku od 37.84 mGy/h. Individualna osjetljivost svakog TLD-a određena je prema formuli 4. Prilikom daljnjih obrada svaki očitani odziv određenog dozimetra se mora podijeliti s njegovom individualnom osjetljivošću kako bi rezultati bili mjerodavni.

Za potrebe određivanja dozne ovisnosti, u SSDL-u ozračeno je 16 dozimetara u polju gama⁷ zračenja izvora ${}^{60}\text{Co}$ kermom u zraku od 0.1, 0.2, 0.5 te 1 Gy. Za svaku kermu ozračeno je istovremeno 4 dozimetra. Dozimetri

su bili u držaču od pleksiglasa naljepljenom na kocku od stiropora te postavljeni na 1 metar od izvora. Brzina kerme u zraku na toj udaljenosti iznosi 57.31 mGy/min. Držač od pleksiglasa ima ulogu build-up zone što dovodi do ravnoteže nabijenih čestica u dozimetrima. Prema formuli 2, u uvjetima CPE doza i sudarna kerma su jednake.

Za TLD-700 postoji eksperimentalno utvrđen faktor koji povezuje kermu u zraku sa dozom u vodi i on iznosi 1.102 odnosno

$$D_{water} = 1.102 K_{air} \quad (5)$$

Za izračun doze u LiF uzme se omjer formule 2 za dozu u LiF i za dozu u vodi gdje se uzima isti tok fotona

$$D_{LiF} = \frac{\left(\frac{\mu_{ab}}{\rho}\right)_{LiF}}{\left(\frac{\mu_{ab}}{\rho}\right)_{water}} \cdot D_{water} \quad (6)$$

Maseni apsorpcijski koeficijenti preuzeti su iz NIST tablica.[5] U tablici I u dodatku A nalaze se izračunate apsorbirane doze u vodi i LiF za dane uvjete zračenja.

II.2.2. Zračenje na akceleratorskom postrojenju

Zračenje TLD-ova ionima ${}^7\text{Li}^{+3}$ energije 12 MeV rađeno je na liniji E9 6 MV Tandem Van de Graaff akceleratora na Institutu Ruđer Bošković. Širina snopa bila je 1x1mm. 12 TLD-ova zaljepljeno je na okvir koji je stavljen u vakuumsku komoru u kojoj se zračilo sa 4 različita toka čestica u rasponu od $9.91 \cdot 10^6 - 2.28 \cdot 10^7$ iona/cm². Svakim tokom čestica ozračeno je po 3 dozimetra. Doseg u LiF izračunat je pomoću programskog paketa SRIM.[6].

U slučaju zračenja 12 MeV ionima ${}^7\text{Li}^{+3}$, ioni se u potpunosti zaustavljaju u volumenu TLD-a. Stoga se može definirati prosječna apsorbirana doza \bar{D} , koja je deponirana u ozračeni volumen dozimetra kao[7]

$$\bar{D} = 1.602 \cdot 10^{-10} \cdot \Phi \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{E}{r} \quad [Gy] \quad (7)$$

gdje je Φ [1/cm²] tok čestica, ρ [g/cm³] gustoća dozimetra, E [MeV] kinetička energija upadnih čestica te r [cm] njihov doseg u materijalu dozimetra. Prefaktor je kako bi se izraza dobio u Gy.

Za podatke zračenja TLD-ova protonima korištena su prethodno napravljena probna mjerenja TLD-ova ozračenih protonima energije 2 MeV na 1 MV Tandem Van de Graaff akceleratoru na Institutu Ruđer Bošković.

Za praćenje pozadinskog zračenja korištena su 3 dozimetra kojima je određena individualna osjetljivost no nadalje nisu bili ciljano zračeni.

U tablici II u dodatku A nalaze se sve informacije o zračenju ionima ${}^7\text{Li}$ i odgovarajuće apsorbirane doze, kao i za protone. Nadalje će sve apsorbirane doze u tekstu biti doze u LiF odnosno u materijalu TLD-700 osim ako nije eksplicitno izrečeno drugačije.

⁵ Luminiscencija koja nastaje zbog kemijskih reakcija

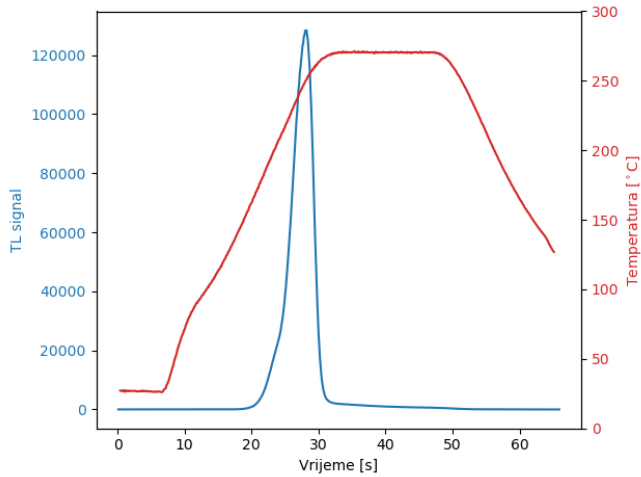
⁶ Energija gama zračenja iznosi 0.66 MeV

⁷ Srednja energija gama zračenja iznosi 1.25MeV

III. REZULTATI

III.1. Mjerenja na fotonima

Prilikom svakog očitavanja dozimetra, dobivena je krivulja isijavanja. Na slici 4 nalazi se reprezentativni primjer krivulje isijavanja dobivene očitanjem TLD-a prethodno ozračenog fotonima izvora ^{60}Co .



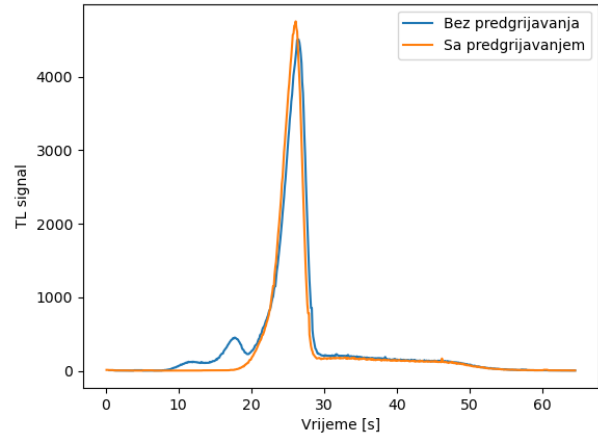
Slika 4: Krivulja isijavanja za TLD ozračen u polju gama zračenja ^{60}Co . U dozimetru je apsorbirana doza 0.18 Gy. Crvena linija prikazuje promjenu temperature u vremenu, dok plava predstavlja TL signal u vremenu.

Jasno je izražen jedan vrh koji odgovara temperaturi od 239°C . To je glavni dozimetrijski vrh. Ovo je tipičan izgled krivulja isijavanja za TLD-700 ozračen fotonima.

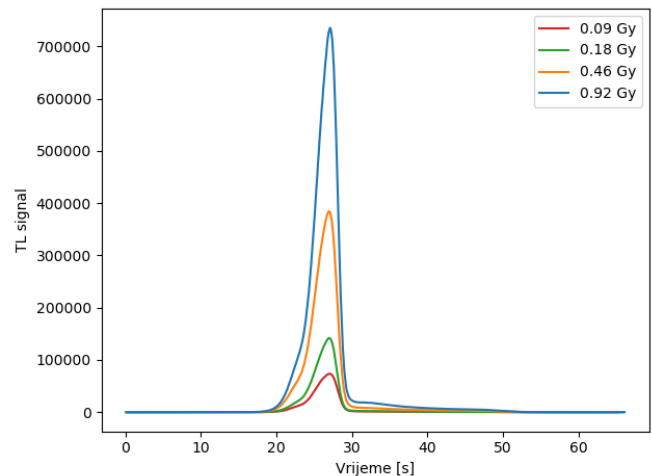
Kako bi se prikazao utjecaj predgrijavanja na izgled krivulje isijavanja, provedno je očitavanje sa i bez predgrijavanja na dozimetrima ozračenim u polju gama zračenja izvora ^{137}Cs . Dane krivulje isijavanja nalaze se na slici 5. Može se uočiti da u slučaju bez predgrijavanja, u krivulji isijavanja se osim glavnog dozimetrijskog vrha razaznaje i manji vrh ostvaren na nižoj temperaturi. U slučaju kada je provedeno predgrijavanje taj vrh je eliminiran. Stoga je predgrijavanje neizostavan korak u procesu očitavanja TLD-ova te se pokazalo da je za slučaj TLD-700 predgrijavanje od $100^{\circ}\text{C}/20\text{min}$ prikladno.

Kako bi se utvrdilo ponašanje krivulje isijavanja obzirom na apsorbiranu dozu, na slici 6 su na istom grafu stavljene po jedan primjer očitavanja TLD-ova ozračenih fotonima izvora ^{60}Co za doze 0.09, 0.18, 0.46 i 0.92 Gy. U sve četiri krivulje isijavanja prisutan je samo glavni dozimetrijski vrh te visina vrha raste s dozom. To je u skladu sa teorijskim očekivanjem obzirom da je površina ispod dozimetrijskog vrha proporcionalna s apsorbiranom dozom. Rast signala se čini linearan te se nadalje ta linearnost provjerava.

Za svako očitavanje, integrira se površina ispod glavnog dozimetrijskog vrha. Kako bi se odstranio dio signala koji odgovara pozadini, koriste se očitavanja kontrol-

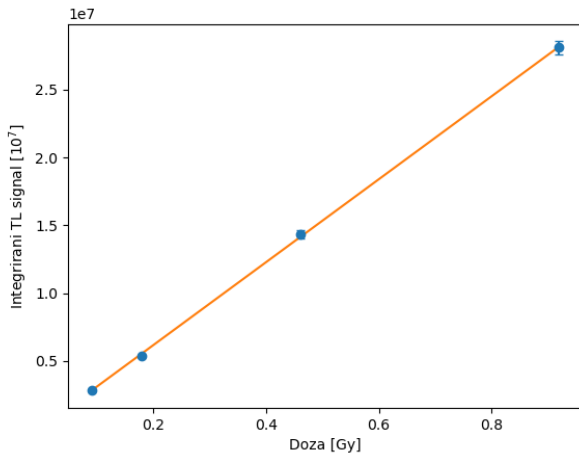


Slika 5: Utjecaj predgrijavanja na krivulju isijavanja. Vidljivo je da u krivulji bez predgrijavanja postoji manji vrh ostvaren na nižoj temperaturi od glavnog dozimetarskog vrha, a koji se eliminira predgrijavanjem.



Slika 6: Krivulje isijavanja za dozimetre ozračen fotonima izvora ^{60}Co dozama 0.09, 0.18, 0.46 i 0.92 Gy. Sve četiri krivulje pokazuju samo glavni dozimetrijski vrh. Visina vrha raste sa porastom doze što je u skladu sa očekivanjem.

nih dozimetara. Krivulje isijavanja kontrolnih dozimetara su integrirane na području gdje se u ozračenima nalazi dozimetrijski vrh. Dobivene vrijednosti se usrednjuju i predstavljaju srednji TL signal pozadine koji se oduzima od integriranog signala svakog ozračenog dozimetra. Zatim se rezultatni integrirani signali za iste doze usrednjuju i predstavljaju odziv TLD-a za tu dozu. Napravljena je linearna regresija na dobivene odzive u ovisnosti o dozi te se konačni graf nalazi na slici 7. Mjereni integrirani TL signal pokazuje linearnu ovisnost o dozi u danom rasponu doza. Linearnost odziva dozimetra jedna je od izrazito poželjnih karakteristika. Ispitano



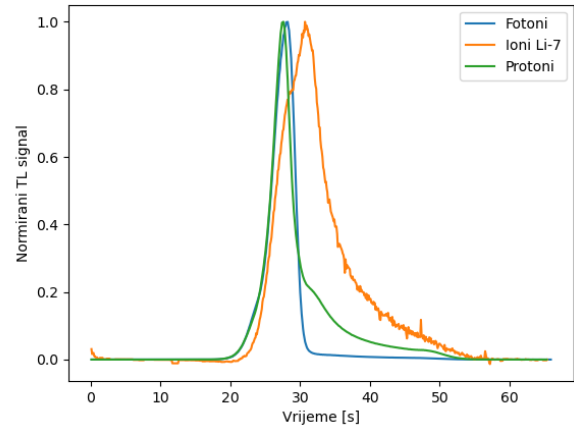
Slika 7: Odstiv TLD u ovisnosti o dozi. Napravljena je linearna regresija. Nagib dobivenog pravca je $a = (3.1 \pm 0.3)10^7$ [1/Gy], a odsječak na y osi $b = (0.6 \pm 2)10^5$. S obzirom da svaka točka mjerenja predstavlja usrednjenu vrijednost više TL signala, istaknuta je i pogreška kao standardna devijacija aritmetičke sredine.

ponašanje TLD-ova ozračenih fotonima je u skladu sa očekivanjem. Zaključuje se da dozimetrijski sustav TLD-700 sa čitačem Toledo 654, Vinten, se uz primjenjene parametre očitavanja, može uspješno koristiti za mjerenje signala zračenja fotonima.

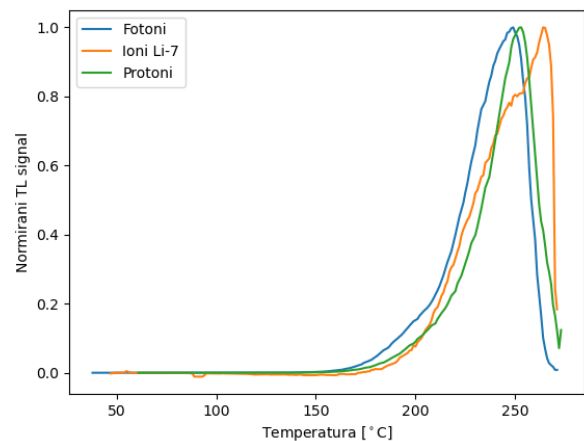
III.2. Usporedba krivulja isijavanja za zračenja fotonima, protonima i ^7Li ionima

Budući da se TLD-700 standardno koriste u fotonim skopovima, njihovo ponašanje za fotone je dobro poznato, a i u ovom radu je istraženo. Stoga se krivulje isijavanja za zračenja protonima i ionima ^7Li uspoređuju sa krivuljom isijavanja za zračenje fotonima na slici 8. U usporednim grafovima, krivulje isijavanja su normirane na maksimum svog vrha. TLD-ovi ozračeni protonima i ^7Li očitavani su dva puta s time da se drugo očitavanje izvodilo odmah nakon prvog. Njihove krivulje isijavanja, prikazane na slici 8, su razlika TL signala prvog i drugog očitavanja. Krivulje isijavanja se razlikuju. Ona za ione ^7Li pokazuje nepravilni, široki vrh sa izbočenjem na jednoj strani i dugim "repom" na drugoj strani. Protonski vrh je uži i pravilniji što ga čini raspoznatljivim spram krivlje isijavanja od ^7Li no njegova krivulja također ima "rep" čime se vidno razlikuje od fotonskog. Kako bi se dobio bolji uvid, napravila se krivulja isijavanja sa temperaturom na x osi prikazana na slici 9.

U temperaturnoj skali je vidljivo da vrh krivulje isijavanja za zračenje ^7Li nije očitav u potpunosti. Za protone je vrh očitav, ali na kraju temperaturnog raspona očitavanja se nazire rast krivulje isijavanja što naznačuje moguću pri-



Slika 8: Usporedba krivulja isijavanja TLD-ova ozračenih fotonima, protonima i ^7Li .

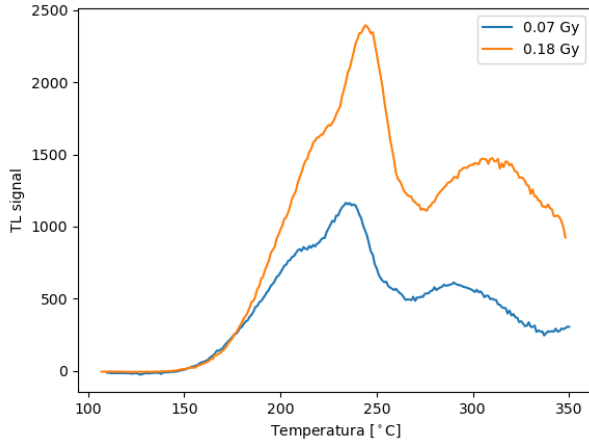


Slika 9: Usporedba krivulja isijavanja u temperaturnoj skali. Iako je vrh od zračenja fotonima u cijelosti zabilježen, signal TLD-a ozračenog ionima ^7Li nije u potpunosti uhvaćen očitanjem. Vrh signala TLD-a ozračenog protonima je cijeli očitav, ali na samom temperaturnom kraju nazire se porast krivulje isijavanja naznačujući potencijalne vrhove na višim temperaturama. Ovaj rezultat pokazuje da kada su u pitanju zračenja nabijenim česticama, za očitavanje TLD-a potrebno je postaviti veću T_{max} .

sutnost vrhova na višim temperaturama. Obzirom da su izmjereni podaci nepotpuni, daljna analiza nije moguća bez novih mjerenja. Kako se signal u TLD-u uništava očitanjem, potrebno je ponovno ozračiti ih i očitavati na temperaturama višim od 270°C .

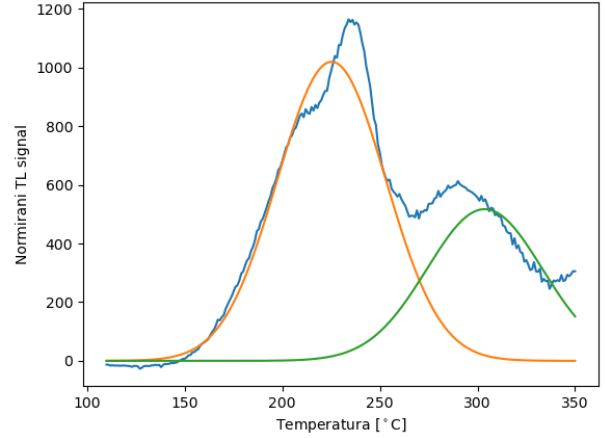
III.3. Dodatno mjerenje na protonima

Kako snop ${}^7\text{Li}$ nije bio dostupan, ozračeno je nekoliko TLD-ova u snopu protona energije 2 Mev na 6 MV Tandem Van de Graff akceleratoru Instituta Ruđer Bošković, u svrhu provjere viskotemperaturnog područja (iznad 270°C) krivulje isijavanja. Prilikom očitavanja primjenjena je stopa zagrijavanja od $5^\circ\text{C}/\text{s}$ do maksimalne temperature od $T_{\text{max}} = 350^\circ\text{C}$. Očitavanje je trajalo 55 sekundi. Primjer dvije krivulje isijavanja u temperaturnoj skali dan je na slici 10. U krivuljama isijavanja, uz glavni

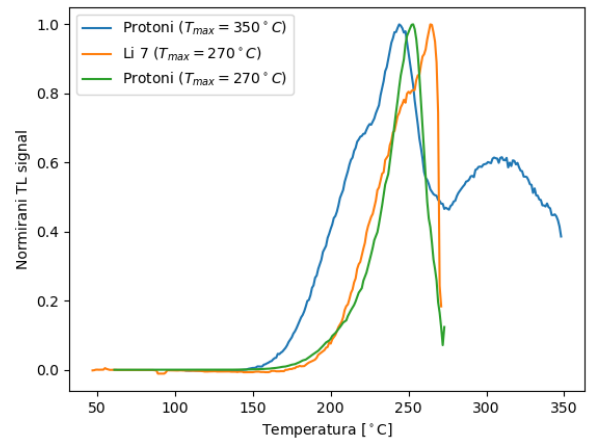


Slika 10: Krivulja isijavanja TLD-ova ozračenih 2 Mev protonima uz očitavanje do maksimalne temperature od 350°C .

dozimetrijski vrh, očituje se i vrh u području visokih temperatura, a koji prijašnjim mjerenjima nije bio obuhvaćen zbog premale temperature zagrijavanja pri očitavanju. Napravljena je i prilagodba na dvije gaussove funkcije prikazana na slici 11 na kojoj su raspoznata dva vrha, glavni dozimetrijski (narančasto) i vrh viskotemperaturnog područja (eng High Temperature Region, HTR) (zeleno). Obzirom da je i u ovom slučaju krivulja isijavanja odrezana, prilagodba je samo naznaka postojanja dodatnog vrha uz glavni dozimetrijski. Konačno, radi se usporedba novog režima očitavanja na protonima i prijašnjeg za protone i ${}^7\text{Li}$ na slici 12. Uspoređivati direktno se može krivulje za protone. Očito je da je promjena uvjeta očitavanja u vidu maksimalne temperature otkrila visokotemperaturne vrhove koji su u prvotnom mjerenju odrezani. Budući da za ${}^7\text{Li}$ nema novih mjerenja, u ovom trenu se može samo pretpostaviti da bi povećanje temperature očitavanja otkrilo visokotemperaturne vrhove i za zračenje sa ${}^7\text{Li}$. To je razumna pretpostavka obzirom da su ioni litija kao i protoni, nabijene čestice, te imaju isti tip međudjelovanja sa materijom. Očekivala bi se razlika u vidu oblika i/ili visine HTR vrha obzirom da su to ipak različite čestice. No za iznošenje konkretnih zaključaka potrebno bi bilo napraviti nova mjerenja na ${}^7\text{Li}$ te isprobavati različite temperature zagrijavanja da



Slika 11: Krivulja isijavanja i dekonvolucija na dvije gaussove funkcije, TLD-a ozračenog 2 Mev protonima dozom od 0.07Gy . Očitavan na 350°C



Slika 12: Usporedni graf krivulja isijavanja za očitavanja na $T_{\text{max}} = 270^\circ\text{C}$ i $T_{\text{max}} = 350^\circ\text{C}$.

se utvrdi optimalna za dobivanje mjerodavne krivulje isijavanja.

IV. ZAKLJUČAK

Provedena je analiza ponašanja TL signala TLD-700 dozimetara zračenih fotonima, protonima i ionima ${}^7\text{Li}$. Za fotone je utvrđeno da se sa zadanim mjernim ciklusom postiže jasan glavni dozimetrijski vrh koji je u slagaju sa očekivanjem. Pokazao se utjecaj predgrijavanja na krivulju isijavanja te se utvrdilo da je predgrijavanje od $100^\circ\text{C}/20\text{min}$ pogodno za eliminiranje niskotemperaturnih vrhova. Pokazano je da je odziv TLD-700 ozračenih fotonima linearno ovisan o dozi u rasponu doza od 0.09 do 0.92Gy . Za TLD-ove ozračene protonima i ${}^7\text{Li}$ ionima,

ustvrđeno je kako zadana maksimalna temperatura od 270°C prilikom očitavanja nije dostatna za mjerodavno očitavanje obzirom da se odreže dio vrh krivulje isijavanja. Obzirom da nije bilo dostupnog snopa ${}^7\text{Li}$, napravilo se dodatno zračenje 2 MeV protonima. Maksimalna temperatura očitavanja za nova mjerenja iznosila je 350°C, a stopa zagrijavanja 5°C/s. Dobivena krivulja isijavanja otkrila je postojanje visokotemperaturnog vrha za protone. Za ${}^7\text{Li}$ se pretpostavlja da bi očitavanje na višoj te-

meperaturi također otkrilo visokotemperaturne vrhove, obzirom da i protoni i ioni spadaju pod direktno ionizirajuće zračenje te imaju isti tip interakcije s materijom. Usprkos tome, potrebno je napraviti nova mjerenja na ${}^7\text{Li}$ kako bi se to moglo ustvrditi. Trenutno se može zaključiti jedino da je za mjerodavno očitavanje TLD-700 zračenog nabijenim česticama potrebna temperatura očitavanja iznad 270°C.

-
- [1] E. Podgoršak, *Radiation Oncology Physics*. Non-serial Publications, Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2005.
- [2] A. Kaiser, J. Eley, N. Onyeuku, S. Rice, C. Wright, N. McGovern, M. Sank, M. Zhu, Z. Vujaskovic, C. Simone, and A. Hussain, "Proton therapy delivery and its clinical application in select solid tumor malignancies," *Journal of Visualized Experiments*, 02 2019.
- [3] Željka Knežević, L. Stolarczyk, I. Bessieres, J. M. Bordy, S. Miljanić, and P. Olko, "Photon dosimetry methods outside the target volume in radiation therapy: Optically stimulated luminescence (osl), thermoluminescence (tl) and radiophotoluminescence (rpl) dosimetry," *Radiation Measurements*, vol. 57, pp. 9–18, 2013. Proceedings of the Workshop: Dosimetry for Second Cancer Risk Estimation EURADOS Annual Meeting Vienna 2012.
- [4] A. McKinlay., *Thermoluminescence Dosimetry-Medical Physics Handbooks 5*. Bristol: Adam Hilger Ltd., 1981.
- [5] "Nist tablice." <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab4.html>.
- [6] "Srim-the stopping and range of ions in matter." <http://www.srim.org>.
- [7] W. Gieszczyk, P. Bilski, P. Olko, R. Herrmann, H. Ketunen, A. Virtanen, and N. Bassler, "Evaluation of the relative thermoluminescence efficiency of lif:mg,ti and lif:mg,cu,p tl detectors to low-energy heavy ions," *Radiation Measurements*, vol. 51-52, pp. 7–12, 2013.

Dodatak A: Tablice

Zračenje Co-60		
K_{air} [Gy]	D_W [Gy]	D_{LiF} [Gy]
0,1	0,11	0,09
0,2	0,22	0,18
0,5	0,55	0,46
1	1,10	0,92

Tablica I: Prijelaz iz kerme u zraku u apsorbiranu dozu u vodi i u LiF za zračenje fotonima ${}^{60}\text{Co}$

Zračenje nabijenim česticama					
Ion	Energija [MeV]	Doseg u LiF [cm]	Ukupan broj upadnih iona	Tok [$1/\text{cm}^2$]	Doza [Gy]
${}^7\text{Li}$	12	2,481E-2	9,91E+04	9,91E+06	0,29
			1,50E+05	1,50E+07	0,44
			2,02E+05	2,02E+07	0,59
			2,88E+05	2,88E+07	0,84
H^+	2	3,757E-2	1,00E+05	1,00E+07	0,3
			1,05E+05	1,05E+07	0,3
			1,95E+05	1,95E+07	0,6
			4,68E+07	4,68E+09	15,12
			9,36E+07	9,36E+09	30,25

Tablica II: Parametri zračenja. Doseg u LiF dobiven je koristeći programski paket SRIM. Apsorbirane doze izračunate prema 7.