

Odziv radiofotoluminiscentnih dozimetara u snopu protona

Luka Pasariček*

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

(Dated: 20. siječnja 2022.)

Cilj ovog rada bilo je proučavanje odziva radiofotoluminiscentnih dozimetara u protonskim snopovima niskih energija.

Korišteni dozimetrijski sustav sastoji se od radiofotoluminiscentnog (RPL) stakla (tip FD-7; dimenzija $16 \times 16 \times 1.5 \text{ mm}^2$) izvađenog iz kućišta RPL dozimetara korištenih za zračenja u okolišu (model SC-1; AGC Techno Glass Co) i čitača signala FGD-202. Standardno, prije ozračivanja dozimetre smo anilirali, a prije samog mjerenja signala stavljeni su u peć na predgrijavanje. Samo ozračivanje odvijalo se na Institutu Ruđer Bošković (IRB), gdje smo pomoću dva elektrostatska ubrzivača (6.0 MV EN Tandem Van de Graaff i 1.0 MV Tandem-tron) dobili protonske snopove energija 1, 2, 3 i 5 MeV. RPL stakla su tijekom ozračivanja stavljena na prikladna postolja i pomoću držača smještena u vakuumsku komoru povezanu s pripadnim ubrzivačem. Broj protona zaustavljenih u dozimetrima bio je $3.3 \times 10^6 - 1.3 \times 10^8$ što je odgovaralo dozama 7.6 – 797.8Gy.

Rezultati impliciraju da u ispitanom području doza, odziv RPL dozimetra ovisi linearno o dozi do određene vrijednosti. U linearnom području porast odziva s dozom je nagliji (veći nagib pravca) za veće energije što ukazuje na energijsku ovisnost odziva dozimetra. Nadalje, dobiven je eksponencijalni porast nagiba pravca s energijom protona.

* lpasari.phy@pmf.hr

I. UVOD

Dozimetrija

Dozimetri su uređaji koji služe mjerenju apsorbirane doze (u nastavku doze), to jest energije koju zračenje pohrani po jedinici mase sredstva kroz koje prolazi

$$D = \frac{E_{poh}}{m} \left[Gy = \frac{J}{kg} \right]. \quad (1)$$

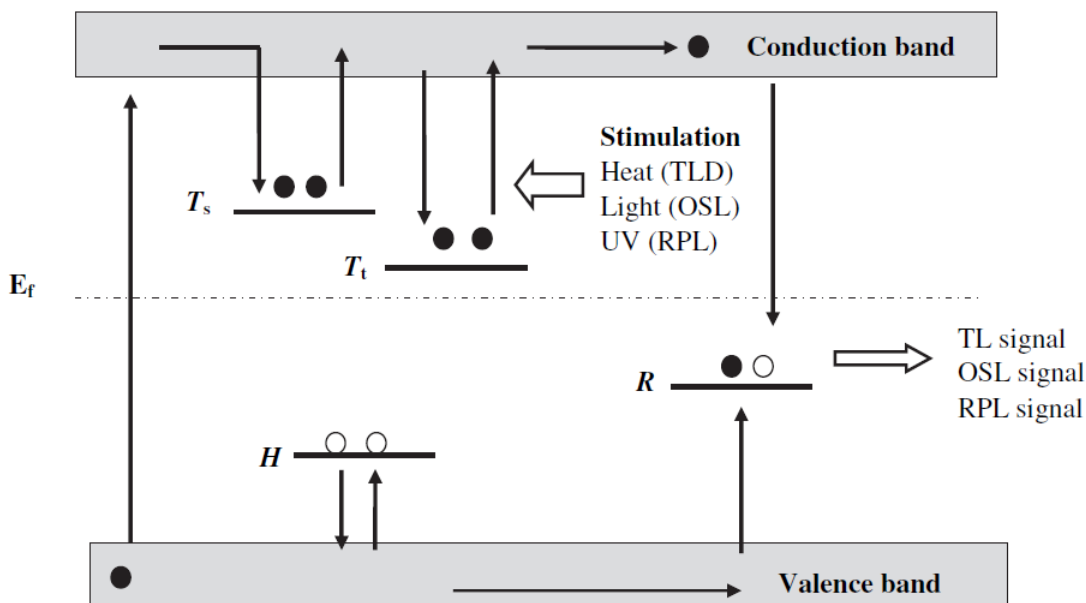
Poželjna dozimetrijska svojstva su¹

- točnost i preciznost
- linearna ovisnost odziva dozimetra i dozimetrijskih veličina
- neovisnost o brzini doze
- neovisnost o energiji upadnog zračenja
- dobra prostorna razlučivost i veličina dozimetra
- praktičnost očitavanja i korištenja

Dozimetar koji bi zadovoljavao sva svojstva i mogao se koristiti u svim uvjetima zračenja, ne postoji. Primjerice, linearnost odziva je moguća u nekom području doze, no izvan njega to nije slučaj. Isto tako, odziv dozimetara ovisi o energiji zračenja, no ta i druge ovisnosti mogu se barem donekle ukloniti prikladnim odabirom kombinacije materijala dozimetra, filtera i čitača signala. Čitači signala dozimetara dolaze u različitim izvedbama i ovise o vrsti dozimetra koju koristimo. Da bismo pravilno interpretirali rezultat dozimetrijskog mjerenja u danim uvjetima, moramo najprije ispitati dozimetrijska svojstva u tim uvjetima.

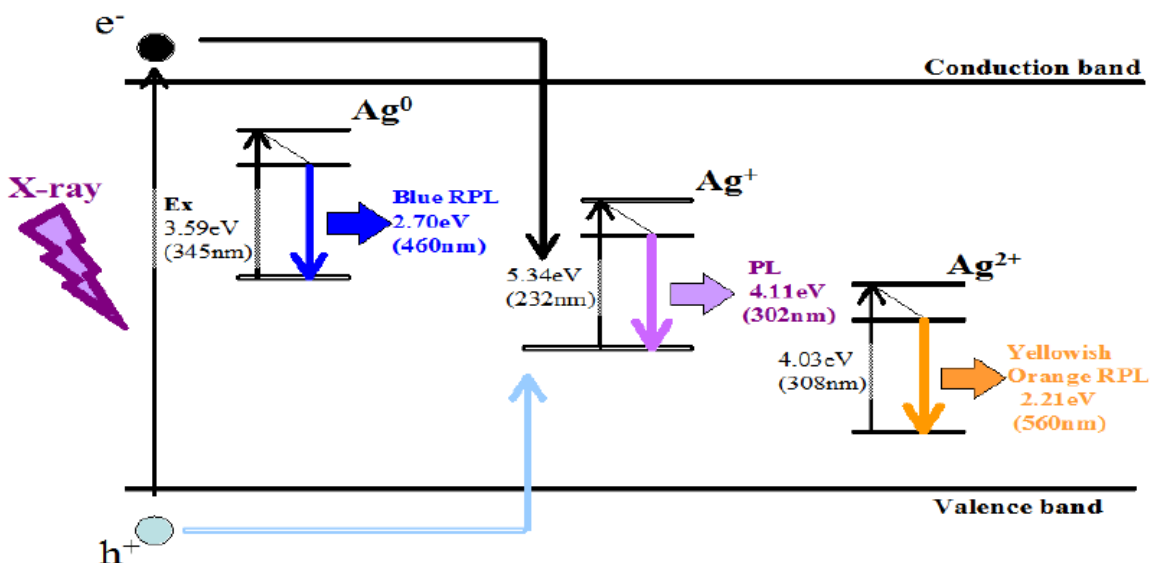
U ovom radu od interesa su nam luminiscentni dozimetri. Oni rade na principu luminiscencije, što znači da pobuđivanjem elektronskog podsustava ozračenog dozimetra toplinom (termoluminiscencija, TL), svjetlošću (optički stimulirana luminiscencija, OSL) ili ultraljubičastim zračenjem (radiofotoluminiscencija, RPL) dozimetar emitira svjetlost, što je potvrda toga da je bio ozračen ionizirajućim zračenjem. Intenzitet emitirane svjetlosti je proporcionalan apsorbiranoj dozi. Osnovni princip prikazan je na slici 1. Apsorpcijom zračenja elektroni prelaze u pobuđena stanja, ostavljajući šupljine u valentnoj ljusci. Već postojeće nečistoće u materijalu lokaliziraju slobodne

elektrone i šupljine neradijativnim prijelazima. Grijanjem ili ozračivanjem prikladnom svjetlošću zarobljeni elektroni ozračenog uzorka apsorbiraju energiju pri čemu prijeđu iz lokaliziranih zamki u vodljivu vrpcu. Ti slobodni elektroni se potom rekombiniraju s lokaliziranim šupljinama pri čemu dolazi do emisije vidljive svjetlosti, odnosno luminiscencije. U ovom radu proučavat ćemo



Slika 1: Osnovni principi TL, OSL i RPL procesa². Ionizirajuće zračenje stvara parove elektrona i šupljina koje zarobe defekti T i H i na taj način nastaju tzv. luminiscentni centri. T_s predstavlja nestabilnu zamku, iz koje je vjerojatnost bijega velika, dok je T_t zamka za elektrone za koju je vjerojatnost oslobodjenja bez vanjske stimulacije zanemariva. Stimulacijom uzorka toplinom (TL), vidljivom svjetlošću (OSL) ili ultraljubičastim zračenjem (RPL), elektroni dobivaju dovoljno energije da napuste zamku i rekombiniraju se sa šupljinama u rekombinacijskim centrima (R). E_f je Fermijev nivo.

RPL dozimetre. Njihova glavna prednost u odnosu na druge luminiscentne dozimetre je zane-
marivo slabljenje odziva u vremenu i mogućnost višekratnog očitavanja¹. Kako bismo razumjeli
zbog čega je opetovano očitavanje moguće promotrit ćemo kako fosfatno staklo dopirano srebrom
(Ag^+) (RPL staklo) reagira na zračenje. Kao što je prikazano na slici 2, ionizirajuće zračenje
pobuđuje elektron u vodljivu vrpcu, dok u valentnoj vrpci ostaje šupljina. Taj elektron i šupljina
difundiraju kroz staklo dok ne naiđu na ione srebra Ag^+ , pri čemu nastaju Ag^0 i Ag^{2+} . Nakon
nekog vremena imamo stabilni broj RPL centara. Ponovno očitavanje je moguće jer se elektron
RPL centra prilikom emisije svjetlosti ne vraća u valentnu vrpcu, kao što je to slučaj kod TL i OSL



Slika 2: Model RPL emisije za fosfatno staklo dopirano srebrom (Ag^+)³.

dozimetara, nego u osnovno stanje RPL centra, kao što je prikazano na slici 2.

Valja napomenuti da se stvaranje stabilnih RPL centara poslije ozračivanja može ubrzati predgrijavanjem, to jest grijanjem ozračenih dozimetara određeno vrijeme. Na slici 3 prikazano je kako relativni intenzitet signala ovisi o vremenu nakon završenog zračenja za različite temperature predgrijavanja.

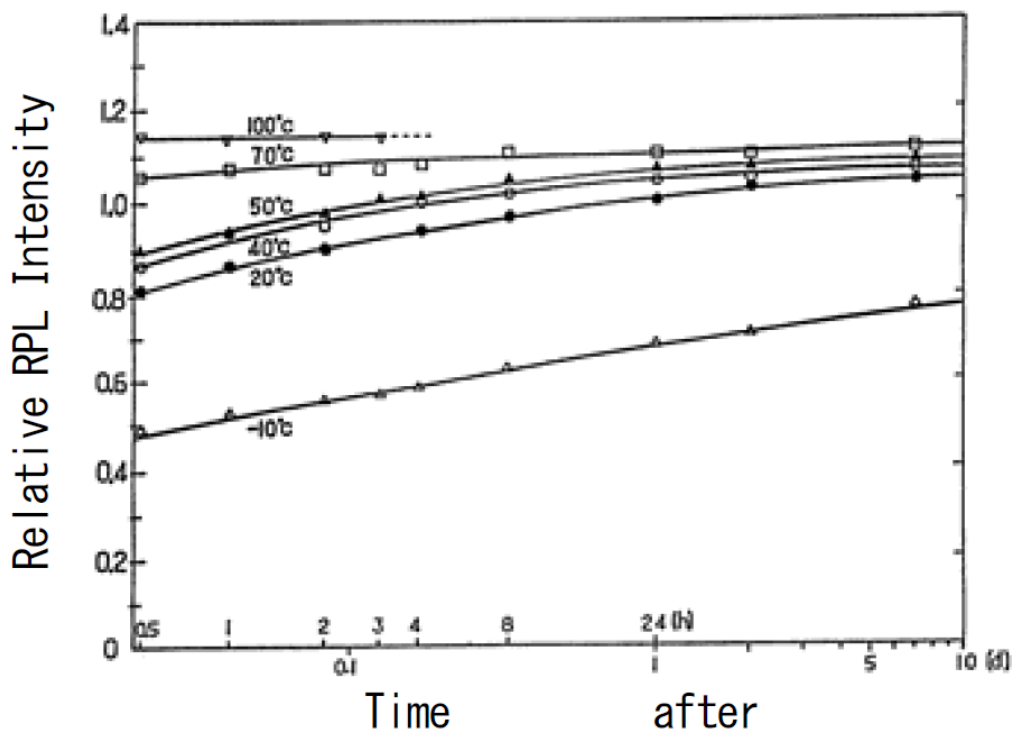
Prije svakog korištenja dozimetre aniliramo tj. grijemo na visokoj temperaturi određeno vrijeme da bi se uklonili postojeći RPL centri.

Međudjelovanje protona i materije

Za razliku od fotona, nabijene čestice s atomima materijala međudjeluju kulonskom silom, pri čemu ovisno o udaljenosti od atoma može doći do polarizacije atoma ili pobuđenja elektrona atoma u viši nivo, ali i ionizacije atoma. Na sve ove načine nabijena čestica gubi energiju tijekom prolaska kroz materijal. Veličina koja govori o tome koliko kinetičke energije upadna nabijena čestica gubi po jedinici prijeđenog puta zove se zaustavna snaga

$$S = \frac{dE_{kin}}{dx}.$$

Ona ovisi o vrsti čestice, njezinoj kinetičkoj energiji i atomskom broju materijala Z te ima dvije



Slika 3: Ovisnost relativnog intenziteta RPL signala o vremenu proteklom poslije ozračivanja za različite temperature predgrijavanja⁴.

komponente

$$S = S_e + S_n.$$

Prva je elektronska zasustavna snaga S_e i obuhvaća gubitke zbog međudjelovanja s elektronima atoma materijala. Tu spadaju gubici zbog polarizacije atoma i pobuđenja elektrona u viši nivo (meki sudari), kao i ionizacija atoma (tvrđi sudari). Druga komponenta S_n uključuje međudjelovanja s atomskim jezgrama materijala. Konkretno, elastične sudare s jezgrom i zakočno zračenje.

Normiramo li zaustavnu snagu po gustoći materijala ρ dobivamo masenu zaustavnu snagu

$$\frac{S}{\rho} = \frac{S_e}{\rho} + \frac{S_n}{\rho}.$$

Nuklearna komponenta masene zaustavne snage $\frac{S_n}{\rho}$ ovisi o zakočnom zračenju, koje je pak posljedica kulonske sile između upadne čestice naboja ze i mase m , kao i naboja jezgre materijala Ze na udaljenosti r

$$F_e = k \frac{zZe^2}{r^2}.$$

Kako energija koju nabijena čestica izrači ovisi o kvadratu njezinog ubrzanja

$$a^2 = \left(\frac{kzZe^2}{r^2m} \right)^2,$$

koje je obrnuto proporcionalno kvadratu mase nabijene čestice, jasno je da će u električnom polju jezgara lakše nabijene čestice imati zakrivljenije putanje i zračiti više od težih čestica. S druge strane, teže nabijene čestice energiju gube i prilikom elastičnih sudara s jezgrom. Ukupno, nuklearna komponenta zaustavne snage protona i težih nabijenih čestica, za razliku od elektrona i pozitrona, zanemariva je, osim za najniže energije.

Druga komponenta, elektronska masena zaustavna snaga $\frac{S_e}{\rho}$, ima dva doprinosa

$$\frac{S_e}{\rho} = \frac{S_e}{\rho}(\text{meki sudari}) + \frac{S_e}{\rho}(\text{tvrđi sudari}),$$

po jedan za svaku vrstu sudara. Doprinos od mekih sudara jednak je za sve nabijene čestice, neovisno o njihovoj masi, što nije slučaj za tvrde sudare. Zbog toga elektronska komponenta masene zaustavne snage ima drugačiji oblik za teže i lakše nabijene čestice. Za teže nabijene čestice brzine $v = \beta c$ u sredstvu masenog broja A elektronska komponenta

$$\frac{S_e}{\rho} \propto \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} [\ln(v^2) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 + \text{const}], \quad (2)$$

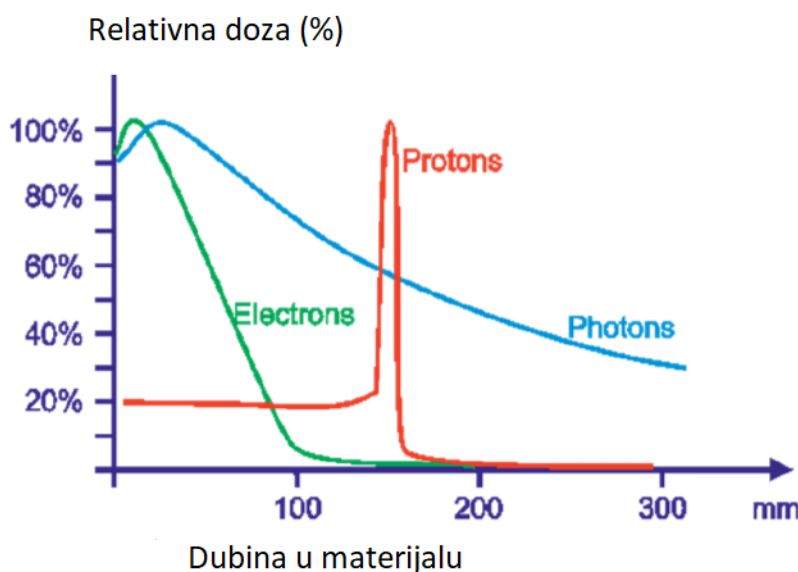
a time i ukupna masena zaustavna snaga, ne ovisi o masi čestice m , ali raste s kvadratom njezinog naboja z^2 . Nadalje, za velike energije gubitak energije putem sudara je minimalan.

Ovi izrazi govore o tome koliko energije ostaje u materijalu, no u dozimetriji nas zanima koliko energije je čestica pohranila u materijalu, to jest kolika je apsorbirana doza. Zbog toga uvodimo linearni prijenos energije (eng. linear energy transfer, LET)

$$L = \frac{dE}{dx},$$

definiran kao energija koja se po jedinici puta prenese materijalu i kojeg povezujemo s dozom. Na slici 4 vidimo da fotoni i elektroni najviše energije prenose čim uđu u materijal, poslije čega se relativna doza smanjuje. S druge strane, relativna doza za protone je vrlo mala sve do samog kraja svoje putanje, gdje pohrane veliku većinu svoje energije. Krivulja takve ovisnosti za protone i teže nabijene čestice, prikazana na slici 4, naziva se Braggova krivulja. Dio krivulje na kojem nabijena čestica preda najveći dio svoje energije naziva se Braggov vrh. Povećamo li početnu kinetičku energiju upadne čestice Braggov vrh se pomiče dublje u materijal. Iz izgleda Braggove krivulje

protona na slici 4 moguće je donijeti neke zaključke o LET-u protona i težih nabijenih čestica. One imaju konstantno malen LET sve do kraja svoje putanje, gdje na malom putu pohrane veliku većinu svoje energije. Taj nagli porast LET-a pri malim energijama očit je u izrazu za njihovu sudarnu masenu zaustavnu snagu (2), gdje vidimo da protoni i teže nabijene čestice energiju gube obrnuto proporcionalno s kvadratom svoje brzine.



Slika 4: Grafički prikaz postotka energije po jedinici mase ozračenog materijala koju snop fotona, elektrona i protona pohrane u materijalu u ovisnosti o dubini u materijalu.

Zbog specifičnog načina gubitka energije opisanog Braggovom krivuljom protoni su pogodni za primjenu u radioterapiji, gdje je važno da korišteni snop energiju pohrane gdje je tumor, a ne zdravo okolno tkivo. Kako bismo protonsko zračenje mogli sigurno primjenjivati u radioterapiji moramo imati pouzdanu dozimetriju, što znači da trebamo znati kako protonski snopovi utječu na odziv dozimetra, koji za većinu dozimetara ovisi o LET-u upadnog zračenja. Budući da se LET povećava smanjivanjem energije i najveća promjena se očekuje upravo za niske energije to jest u Braggovom vrhu, u ovom radu cilj nam je ispitati odziv dozimetra u niskoenergetskom području. U dosadašnjim istraživanjima⁽⁵⁻⁸⁾ svojstva RPL dozimetara su ispitivana koristeći protonske snopove visokih energija (koje se najčešće koriste u radioterapiji, 100 – 200 MeV) te su energije na određenim dubinama u materijalu gdje se postavi dozimetar računane koristeći Monte Carlo simulacije. U ovom radu cilj je ispitati odziv RPL dozimetra za upadne protonske snopove poznatog toka i poznatih niskih energija pri kojim se svi protoni zaustavljaju u dozimetru.

II. EKSPERIMENTALNI POSTAV I OBRADA PODATAKA

U našim eksperimentima koristili smo dozimetrijski sustav koji se sastoji od radiofotoluminiscentnog (RPL) stakla (tip FD-7; dimenzija $16 \times 16 \times 1.5 \text{ mm}^2$) izvađenog iz kućišta RPL dozimetara korištenih za zračenja u okolišu (model SC-1; AGC Techno Glass Co; slika 5) i čitača FGD-202. Staklo je fosfatno i dopirano srebrom (Tablica I), a kućiše ima filtre za korekciju energetske ovisnosti kod fotonskog zračenja.



Slika 5: Vrsta RPL dozimetra korištenog u radu⁹.

Element	Na	P	O	Al	Ag
mol%	11.0	31.5	51.2	6.1	0.2

Tablica I: Sastav FD-7 stakla u molarnim postocima.

Kako bi se osiguralo da u staklima nema RPL centara od prijašnjih zračenja, dozimetri bez kućišta su prije mjerenja stavljeni u peć i grijani do temperature $400 \text{ }^\circ\text{C}$, na kojoj su ostavljeni sat vremena. Poslije zračenja, a prije očitavanja čitačem, dozimetri su na pola sata stavljeni u drugu peć na predgrijavanje (70°C) kako bi se ubrzalo stvaranje RPL centara.

Samo ozračivanje odvijalo se na Institutu Ruđer Bošković (IRB). Za dobivanje protonskih snopova potrebnih energija koristili smo dva elektrostatska ubrzivača: 6.0 MV EN Tandem Van de

Graaff i 1.0 MV Tandetron. Kako se nabijena čestica ubrzava u dvije faze, energija samog snopa dana je s

$$E = (Z + 1)eU,$$

gdje je Z protonski broj izlazne čestice, a U narinuti napon.

RPL stakla su prije ozračivanja stavljena na prikladna postolja i pomoću držača smještena u komoru povezanu s pripadnim ubrzivačem. U samoj komori se pomoću dvije vakuumske pumpe postigao visoki vakuum ($\sim 10^{-5}$ Pa) kako bi se izbjegli sudari snopa sa česticama zraka prije dolaska do mete. To je bilo posebno važno jer su energije naših protonskih snopova ($E = 1$ MeV, 2 MeV, 3 MeV i 5 MeV) niske, a same dimenzije snopa male ($A = 1 \times 1$ mm²). Mjerenjem broja protona kojima je gađana meta u jedinici vremena, kao i mjerenjem vremena ozračivanja (1 – 17 min), dobiven je broj protona koji se zaustavio u dozimetru N ($10^6 - 10^8$).

Dubina zaustavljanja, to jest doseg R , kao i LET protona za RPL staklo i vodu izračunati su pomoću programskog paketa Stopping and range of ions in matter (SRIM), dok je očitavanje dozimetara pomoću čitača dalo odziv dozimetra I . Čitač svaki dozimetar očita n puta ($n = 10$) i u nastavku se koristi izračunata srednja vrijednost i nepouzdanost (3) te relativna nepouzdanost (4). Relativne nepouzdanosti iznosile su najviše 8%.

$$M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

$$R = \frac{M}{\bar{I}} \quad (4)$$

Tok protona (tj. broj protona koji u jedinici vremena pada na metu) se mjerio prije i poslije ozračivanja dozimetra te se izračunala, i dalje u računu koristila, srednja vrijednost i nepouzdanost. Za snopove energija 3 i 5 MeV najveća promjena je iznosila 13%, dok je za snopove manjih energija najveća promjena iznosila 36%.

Apsorbirana doza, definirana izrazom (1), u ovom slučaju svodi se na

$$D = \frac{NE}{m}, \quad (5)$$

gdje je E energija jednog protona, N je broj protona zaustavljenih u dozimetru, m je masa ozračenog volumena i vrijedi

$$m = \rho AR, \quad (6)$$

gdje su gustoća ρ i doseg R specifični za dani materijal te je A površina poprečnog presjeka upadnog snopa. Gustoća vode je $\rho = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, gustoća RPL stakla je $\rho = 2.61 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, a doseg za njih za korištene energije snopova dan je u tablicama II i III.

$E[\text{MeV}]$	1	2	3	5
$R[\mu\text{m}]$	25.10	74.64	146.17	352.05

Tablica II: Doseg (R) protonskih snopova različitih energija (E) u vodi.

$E[\text{MeV}]$	1	2	3	5
$R[\mu\text{m}]$	13.67	40.07	77.54	183.05

Tablica III: Doseg (R) protonskih snopova različitih energija (E) u RPL staklu.

Nadalje, kako želimo povezati odziv dozimetra I i apsorbiranu dozu D , provjeravamo je li njihov odnos linearna funkcija. To činimo računanjem koeficijenta linearnosti f , koji je definiran kao omjer odziva dozimetra po broju upadnih protona I/N i neke referentne vrijednosti te veličine iz linearnog područja I_0/N_0 :

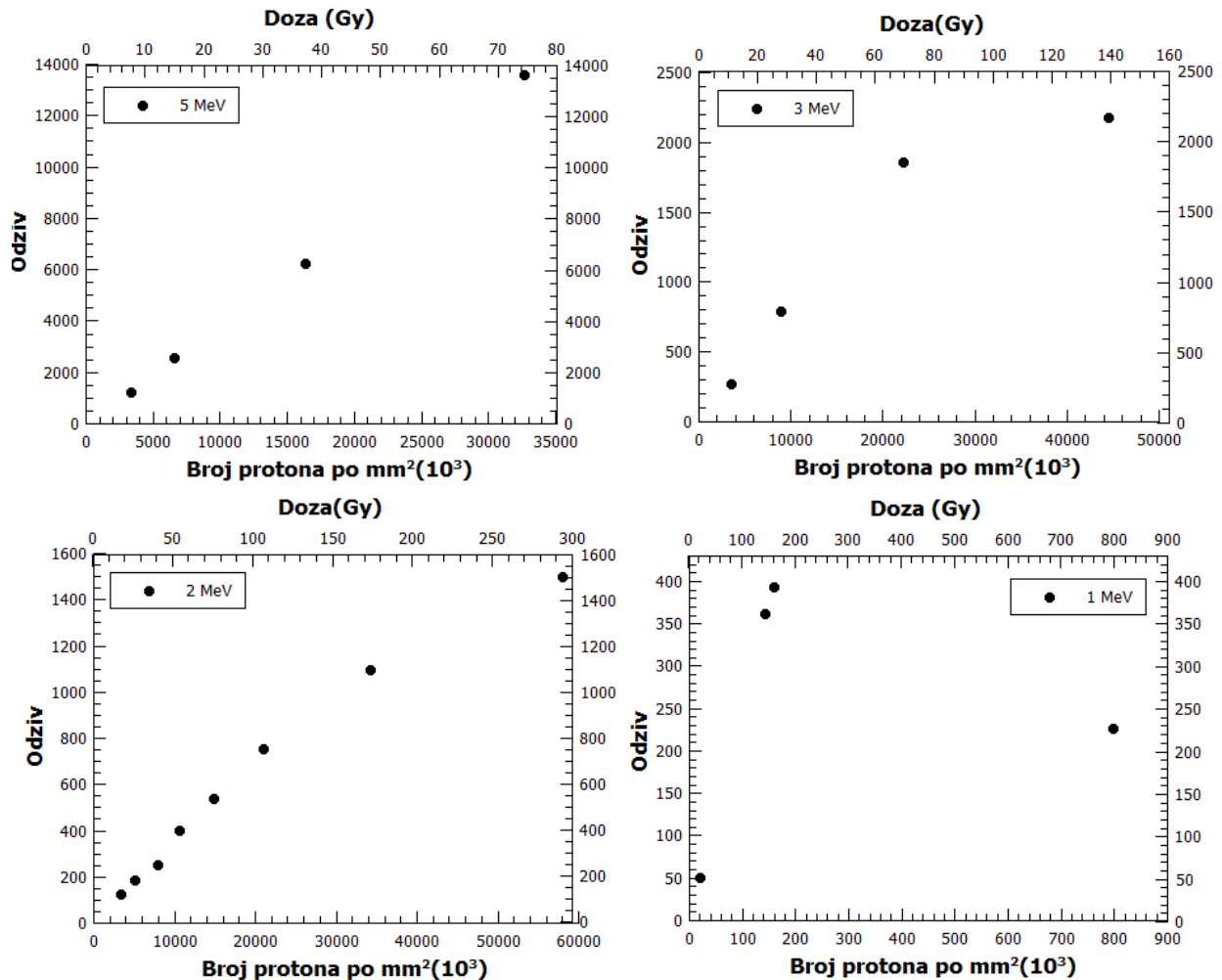
$$f = \frac{\frac{I}{N}}{\frac{I_0}{N_0}} \quad (7)$$

Na temelju nepouzdanosti za I i N izračunata je nepouzdanost za f . Treba napomenuti da je, zbog toga što se ispitivani dozimetri koriste za fotonsko zračenje i zbog toga što su doze bile velike, prije i nakon zračenja s protonima na izvoru γ -zračenja (^{137}Cs , energije 661 keV) provjerena osjetljivost dozimetara. Mjerenje se odvijalo u Sekundarnom Standardnom Dozimetrijskom Laboratoriju (SSDL) na IRB-u, a individualna osjetljivost dozimetra φ definirana je standardno kao omjer odziva pojedinog dozimetra I i srednje vrijednosti svih dozimetara ozračenih određenom dozom I_{avg}

$$\varphi = \frac{I}{I_{avg}}$$

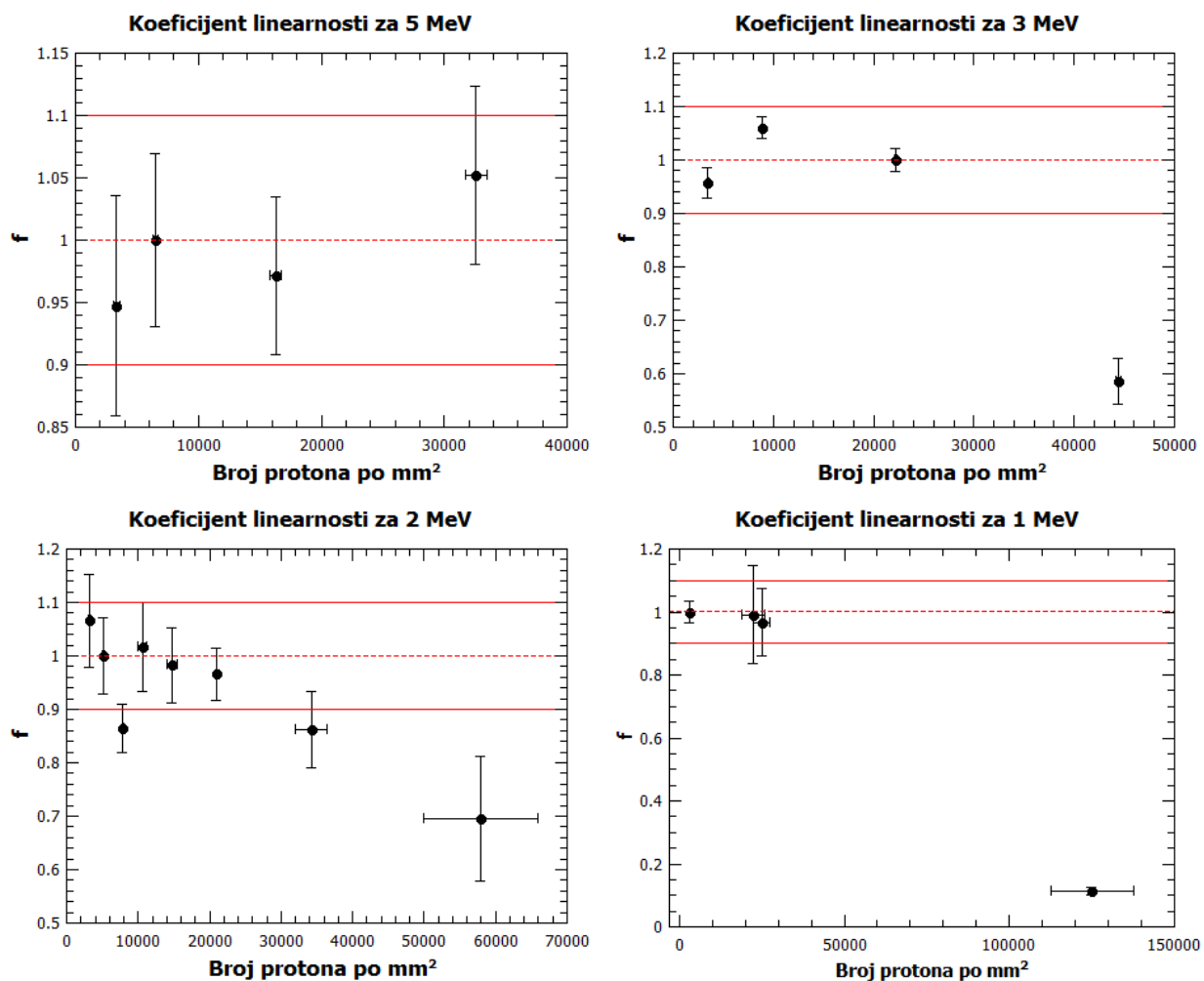
III. REZULTATI I RASPRAVA

Grafovi na slici 6 prikazuju ovisnost odziva dozimetra I o broju protona N , koji su po mm^2 upali na dozimeter, i apsorbiranoj dozi izračunatoj za vodu D kojoj bi to odgovaralo da je dozimeter napravljen od vode za snopove energije 5 MeV, 3 MeV, 2 MeV i 1 MeV. Doze su izračunate kombinacijom izraza (5) i (6) i bile su u rasponu 7.6 – 74.2 Gy za energiju protona 5 MeV, u rasponu 11.3 – 146.2 Gy za energiju 3 MeV, u rasponu 13.9 – 249.0 Gy za energiju 2 MeV i u rasponu 20.8 – 797.8 Gy za energiju 1 MeV. Broj zaustavljenih protona bio je u rasponu $3.3 \times 10^6 - 3.3 \times 10^7$ za 5 MeV, $3.5 \times 10^6 - 4.5 \times 10^7$ za 3 MeV, $3.2 \times 10^6 - 5.8 \times 10^7$ za 2 MeV i $3.3 \times 10^6 - 1.3 \times 10^8$ za 1 MeV.



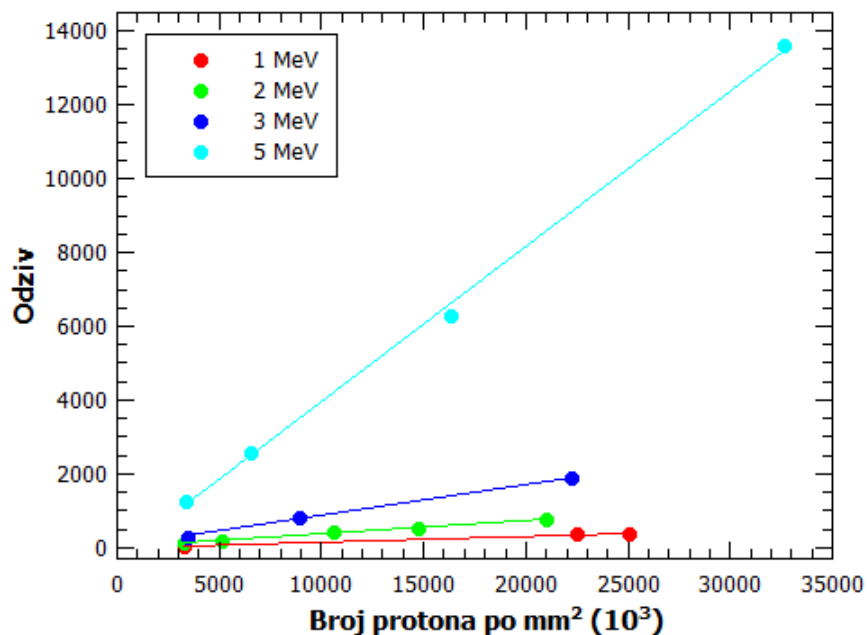
Slika 6: Ovisnost odziva dozimetra (I) o broju protona (N) koji su po mm^2 upali na dozimeter i apsorbiranoj dozi (D) izraženoj kao "doza u vodi" za snop energije 5, 3, 2 i 1 MeV.

Dobiveni rezultati sugeriraju linearnost do određene doze i nakon toga sublinearnost. Grafovi na slici 7 prikazuju ovisnost koeficijenta linearnosti f o broju protona N . Za većinu točaka vrijednost f je u intervalu 0.9 i 1.1 što ćemo smatrati linearnim područjem. Vrijednosti manje od 0.9 ukazuju na moguću sublinearnost. Za snopove energije 5 MeV linearna ovisnost odziva o broju zaustavljenih protona, tj. apsorbiranoj dozi, potvrđena je za cijelo ispitano područje tj. za raspon protona $3.3 \times 10^6 - 3.3 \times 10^7$ za 5 MeV. Za snopove energije 3 MeV linearnost je vidljiva za raspon protona $3.5 \times 10^6 - 2.2 \times 10^7$, dok f za najveću dozu, odnosno najveći broj protona, ukazuje na sublinearnost, tj. smanjeni odziv ($f = 0.6$). Za snopove energije 1 MeV linearnost je vidljiva za tri najmanje doze tj broj protona, dok rezultat za najveću ispitanu dozu sugerira sublinearnost ($f = 0.1$). U slučaju 2 MeV, 3 (od 8) vrijednosti za f je manje od 0.9.



Slika 7: Ovisnost koeficijenta linearnosti (f) o broju protona po mm^2 za snopove energija 5, 3, 2 i 1 MeV. Prikazane su i pripadne nepouzdanosti.

Promatramo li samo linearno područje, odziv dozimetra za različite energije protonskih snopova izgleda kao na slici 8. Vidimo da odziv raste s brojem upadnih protona i raste naglije za veće energije. Nagib pravca a , njegova nepouzdanost M_a i R^2 vrijednost dobivena linearnom prilagod-



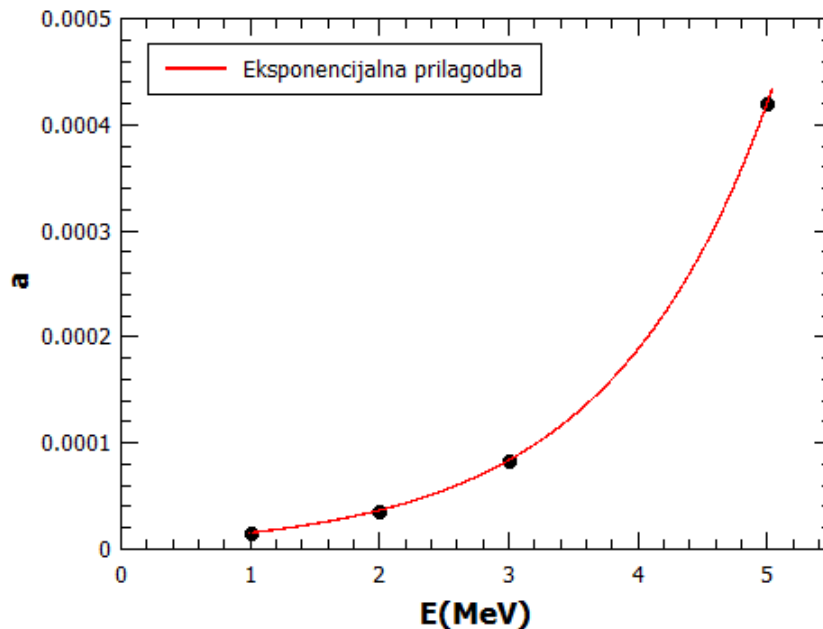
Slika 8: Ovisnost odziva dozimetra o broju protona kojim smo ga gađali za energije snopova 1, 2, 3 i 5 MeV.

bom na pravac za energije snopova 1, 2, 3 i 5 MeV prikazani su u tablici IV. R^2 je statistička mjera odstupanja eksperimentalnih podataka od pravca i nalazi se u intervalu 0-1. $R = 1$ značio bi da sve točke leže na pravcu.

E[MeV]	a [mm ²]	M_a [mm ²]	R^2
1	0.0158	0.0004	0.9994
2	0.0361	0.0008	0.9990
3	0.084	0.003	0.9986
5	0.42	0.01	0.9984

Tablica IV: Koeficijent pravca (a), njegova nepouzdanost (M_a) i R^2 vrijednost dobivena linearnom prilagodbom podataka prikazanih na slici 8 za energije snopova 1, 2, 3 i 5 MeV.

Grafički prikaz ovisnosti nagiba pravca a o energiji protona E dan je na slici 9. Crvena linija predstavlja ekponencijalnu prilagodbu oblika $Ae^{E/\tau}$, s amplitudom $A = (7.8 \pm 0.3)10^{-6}$ i parametrom $\tau = (1.26 \pm 0.01)$ MeV. U teoriji je poznato da se koeficijent a (odziv normiran po broju protona) može povezati s učinkovitošću dozimetra. Dobiveni rezultati pokazuju da se smanjivanjem energije učinkovitost ispitivanih dozimetara smanjuje.



Slika 9: Ovisnost nagiba pravca a o energiji protona E . Crvena linija predstavlja ekponencijalnu prilagodbu oblika $Ae^{E/\tau}$ s amplitudom $A = (7.8 \pm 0.3) \times 10^{-6}$ i parametrom $\tau = (1.26 \pm 0.01)$ MeV.

Računanjem individualne osjetljivosti dozimetara prije i nakon zračenja protonima ustanovilo se da se ona nije promijenila te je bila u rasponu 0.97 – 1.14.

IV. ZAKLJUČAK

Za ispitano područje doza, rezultati impliciraju da odziv RPL dozimetra u protonskim snopovima, do određene vrijednosti, ovisi linearno o dozi. Vidljivo je i da odziv ovisi o energiji: nagib pravca se povećava s energijom, što se može povezati s većom učinkovitošću dozimetra na većim energijama. Nadalje, krivulja ovisnosti nagiba pravca, dobivenog linearnom prilagodbom na graf ovisnosti odziva dozimetra o broju upadnih protona, i energije protona sugerira ekponencijalnu

vezu između tih veličina.

- ¹ E.B. Podgorsak (2005): Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students; ISBN: 92-0-107304-6
- ² Ž. Knežević et al., Photon dosimetry methods outside the target volume in radiation therapy: Optically stimulated luminescence (OSL), thermoluminescence (TL) and radiophotoluminescence (RPL) dosimetry; Radiation Measurements 57 (2013) 9-18
- ³ T. Yamamoto, RPL Dosimetry: Principles and Applications; AIP Conference Proceedings 217 (2011) 1345; <https://doi.org/10.1063/1.3576169>
- ⁴ Asahi Techno Glass Corporation, RPL Glass Dosemeter Environmental Monitoring System (2000)
- ⁵ J. Nagata et al., Evaluation of radiophotoluminescent glass dosimeter response for therapeutic spot scanning proton beam: suggestion of linear energy transfer-based correction; Journal of Applied Clinical Medical Physics 00 (2021) 1–8; <https://doi.org/10.1002/acm2.13378>
- ⁶ K. Yasui et al., Dosimetric response of a glass dosimeter in proton beams: LET-dependence and correction factor; Physica Medica 81 (2021) 147-154; <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.12.001>
- ⁷ J.-E. Rah et al., Dosimetric evaluation of a glass dosimeter for proton beam measurements; Applied Radiation and Isotopes 70 (2012) 1616-1623; <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.04.007>
- ⁸ H. Yasuda, K. Fujitaka, Responses of TLD Mg₂SiO₄: Tb and Radiophotoluminescence Glass to Heavy Charged Particles and Space Radiation; Radiation Protection Dosimetry 87 (2000) 115–119
- ⁹ David Y.C. Huang and Shih-Ming Hsu (2011). Radio-Photoluminescence Glass Dosimeter (RPLGD), Advances in Cancer Therapy, Prof. Hala Gali-Muhtasib (Ed.), ISBN: 978-953-307-703-1; <http://www.intechopen.com/books/advances-in-cancer-therapy/radio-photoluminescence-glass-dosimeterplgd>