

(10) **LT 2014 141 A**

(12) **PARAIŠKOS APRAŠYMAS**

- (21) Paraiškos numeris: **2014 141** (51) Int. Cl. (2016.01): **G01T 1/00**  
**G01T 3/00**
- (22) Paraiškos padavimo data: **2014-12-15**
- (41) Paraiškos paskelbimo data: **2016-06-27**
- (62) Paraiškos, iš kurios dokumentas išskirtas, numeris: —
- (86) Tarptautinės paraiškos numeris: —
- (86) Tarptautinės paraiškos padavimo data: —
- (85) Nacionalinio PCT lygio procedūros pradžios data: —
- (30) Prioritetas: —
- (71) Pareiškėjas:  
**Vilniaus universitetas, Universiteto g. 3, LT-01513 Vilnius, LT**
- (72) Išradėjas:  
**Eugenijus GAUBAS, LT**  
**Tomas ČEPONIS, LT**  
**Vidas KALESINSKAS, LT**  
**Juozas Vidmantis VAITKUS, LT**
- (74) Patentinis patikėtinis/atstovas:  
**Eugenijus GAUBAS, Saulėtekio al. 9-III, TMF, LT-10222 Vilnius, LT**

(54) Pavadinimas:

**Aukštųjų energijų apšvitos didelių įtėkių bei dozių matavimo būdas ir įrenginys**

(57) Referatas:

Pasiūlymas yra iš jonizuojančiosios spinduliuotės matavimų srities ir gali būti naudojamas aukštųjų energijų apšvitos didelių įtėkių bei dozių matavimams. Pasiūlytame būde nežinomos spektrinės sudėties spinduliuotės doze matuojama apšvitintą dozimetą paeiliui patalpinant į EPR spektrometrą, ir krūvininkų rekombinacijos trukmių matuoklį, kuriame antrojo jutiklio monokristalinio silicio nepusiausvirųjų krūvininkų rekombinacijos trukmė matuojama kristalą paveikus trumpu lazerio šviesos impulsu, registruojant fotolaidumo relaksaciją mikrobangų zondavimo nesąlytiniu būdu, o alanino jutiklio ir papildomo silicio jutiklio matmenys, padėtis ir orientacija parenkami taip, kad abu jutikliai sudarytų vieną tandeminį dozimetą. Pasiūlytame tandeminiame dozimetre papildomo silicio monokristalo jutiklio paviršius padengiamas pasyvuojančiu sluoksniu tokio storio, kad išlaikytų reikiamą statinį elektrinį krūvį, būtų atsparus jonizuojančiai spinduliuotei ir būtų suderintas su silicio kristalo laidumo tipu. Šis apšvitos įtėkių bei dozių matavimo būdas ir įrenginys leidžia sparčiai matuoti nesąlytiniu būdu didelius apšvitos įtėkius plačiame intervale, tinka didelės apimties stebėsenos sistemoms, leidžia nustatyti spinduliuotės šaltinio lokalizaciją yra kompaktiškas ir paprastos konstrukcijos.

## AUKŠTŪJŲ ENERGIJŲ APŠVITOS DIDELIŲ ĮTĖKIŲ BEI DOZIŲ MATAVIMO BŪDAS IR ĮRENGINYS

Pasiūlymas yra iš jonizuojančiosios spinduliuotės matavimų srities ir gali būti naudojamas aukštųjų energijų apšvitų įtėkio bei dozės matavimams didelių įtėkių srityje.

Yra žinoma daug būdų ir įtaisų radiacijos dozei matuoti, kurie yra pagrįsti įvairių medžiagų, paveiktų spinduliuote, struktūrinių ir fizinių savybių pokyčių matavimais.

Būdo analoge matuoja laisvųjų radikalų koncentraciją apšvitintame tabletiniame arba juosteliniame alanino dozimetre elektronų sukinių paramagnetinio rezonanso būdu (EPR spektrometrijos metodas) ir iš EPR spektro tam tikrų linijų amplitudžių santykio apskaičiuoja dozometro sugertos energijos vertę, tenkančią dozometro masės vienetui – dozę. Šis santykis gana plačiame energijų intervale priklauso tiesiškai nuo apšvitės energijos. Laikoma, kad alanino dozometro atsakas, apšvitinus jį  $\gamma$ -spinduliuote, aprašomas eksponentine priklausomybe nuo dozės dydžio [Katz R., Sharma S. C., and Homayoonfar M. The structure of particle tracks. In *Topics in Radiation Dosimetry, Radiation Dosimetry Suppl. 1* (Ed. Attix, F. H.) Academic press, New York. 1972.]. Būdo analogo trūkumas yra tai, kad įvairios sudėties spinduliuotei (elektringoms dalelėms, neutronams) reikia koreguoti dozometro atsaką, įvedant santykinį efektyvumą, kuris ženkliai priklauso nuo detalaus spinduliuotės spektro ir gali būti sumodeliuotas žinant dalelės krūvį, greitį, dalelių įtėkį (srautą) ir dozės radialinį pasiskirstymą apie dalelės pėdsaką. Dėl šios priežasties alanino dozimetrai naudojami jau žinomos sudėties spinduliuotės, dažniausiai  $\gamma$ , dozimetrijai.

Būdą realizuojančio įrenginio analogas, yra sudarytas iš dozometro laikiklio, ant kurio yra patalpintas alanino dozimetras, kurio dozė, sugerta radiacinės ekspozicijos metu, yra nuskaitoma EPR matavimo įrenginyje, ir dozometro identifikavimo žymeklių [WO2008077891, 2008-07-03], skirtų dozimetrai identifikuoti. Įrenginio trūkumas yra tai, kad juo galima išmatuoti tik žinomos spektrinės sudėties spinduliuotės dozę. Kiti dozometro trūkumai yra tai, kad aukštųjų apšvitų srityje jo jautrumas smarkiai sumažėja, jo kalibravimas virš tam tikro energijų lygio tampa neapibrėžtas, netinka hadronų įtėkiui matuoti.

Analogo trūkumams pašalinti, matavimo būde nežinomos spektrinės sudėties spinduliuotės suminę dozę įvertina patalpinę apšvitintą tandeminių dozimetra į pirmąjį matuoklį – EPR spektrometra, kuriame matuoja, viename iš jutiklių – alanine, susidariusių laisvųjų radikalų koncentraciją, ir papildomai, į kitą matuoklį, kuriame matuoja antrojo jutiklio – monokristalinio silicio nepusiausvirųjų krūvininkų rekombinacijos bei krūvininkų prilipimo momentines trukmes. Apšvitės dozę ir spinduliuotės spektrinę sudėtį apskaičiuoja apdorojė abiejų matuoklių nuskaitymus ir įvertinę santykinį dozometro efektyvumą. Papildomai būde monokristalinio silicio

nepusiausvirųjų krūvininkų rekombinacijos ir krūvininkų prilipimo trukmes matuoja kristalą paveikę trumpu lazerio šviesos impulsu, o jo atsaką – fotolaidumo relaksaciją, registruoja mikrobangų zondavimo nesąlytiniu būdu. Hadronų įtekį apskaičiuoja panaudoję išmatuotą rekombinacijos trukmę.

Analogo trūkimams pašalinti apšvitos dozės matavimo įrenginyje, sudarytame iš alanino dozometro, jo laikiklio ir laikiklio identifikavimo žymeklio, **papildomai**, toje pačioje laikiklio pusėje kaip ir alanino jutiklis, patalpina antrąjį jutiklį, silicio monokristalą, padengtą pasyvuojančiu sluoksniu, o kristalo matmenis, padėtį ir orientaciją parenka taip, kad abu jutikliai sudarytų vieną tandeminių dozimetų. Pasyvuojančio sluoksnio storį ir struktūrą parenka taip, kad šis sluoksnis išlaikytų reikiamą vidinį elektrinį statinį krūvį, būtų atsparus spinduliuotei ir būtų suderintas su silicio kristalo elektrinio laidumo tipu.

Principinė aukštųjų energijų apšvitų įtekio bei dozės matavimo metodo struktūrinė schema yra pateikta **Fig. 1**, kur skaitmenimis parodyta veiksmų seka: 1 – tandeminių dozimetų apšvitinimas aukštųjų energijų spinduliuote; 2 - apšvitintų dozimetų testavimas paeiliui EPR spektrometru; 3 - tų pačių apšvitintų dozimetų testavimas paeiliui rekombinacijos trukmių matuokliu; 4 – EPR spektrometro ir rekombinacijos trukmių matuoklių išmatuotų verčių susiejimas su tandeminių dozimetų lokalizacijos koordinatėmis ir žymekliais; 5 – aukštųjų energijų spinduliuotės tipo, dozės, įtekio ir spinduliuotės šaltinio lokalizacijos įvertinimas iš nuskaitytų EPR ir rekombinacijos trukmių duomenų.

Tandeminio dozometro konstrukcija yra parodyta **Fig. 2**, kur skaitmenimis pažymėta: 1 – tandeminio dozometro laikiklis; 2 – alanino dozimetras; 3 – silicio dozimetras; 4 – tandeminio dozometro identifikavimo žymeklis.

Didelės energijos apšvitos įtekio bei dozės matavimo įrenginys veikia tokiu būdu. Apšvitinus įrenginio jutiklius (2, 3) aukštųjų energijų spinduliuote juose įvyksta negrįžtami molekuliniai ir struktūriniai fizikinių savybių pokyčiai. Pirmajame jutiklyje – alanine (2) susidaro laisvieji radikalai, kurių koncentracija yra proporcinga sugertai dozei. Radikalų koncentracija yra matuojama elektronų sukinių paramagnetinio rezonanso būdu, ir iš EPR spektro yra apskaičiuojama alanino jutiklio sugertos energijos vertė, tenkanti masės vienetui – dozė. Alanino jutiklio laisvųjų radikalų koncentracijos ir dozės sąryšis nėra tiesinis. Dozometro atsakui modeliuoti ir šiam sąryšiui nustatyti taikomas žinomas dalelės pėdsako struktūros modelis. Laikoma, kad EPR aktyvaus centro (alanino atveju, laisvojo radikalo) sudarymo tikimybei galioja Puasono statistika. Tuomet EPR centro sudarymo tikimybė  $P(D)$ , paveikus jutiklį  $\gamma$ -spinduliuotės doze  $D$ , yra

$$P(D) = S(D)/S_0 = 1 - \exp(-D/E_0), \quad (1)$$

kur  $S(D)$  ir  $S_0$  yra laisvųjų radikalų kiekis (alanino jutiklio svorio vienetui), atitinkamai, paveikus doze  $D$  ir soties doze, o  $E_0$  yra testinė  $\gamma$ -spinduliuotės dozė, kuriai esant,  $1/e$  (~37%) aktyviųjų centrų yra neaktyvuotoje būsenoje. Centras susidaro, kai į jį pataiko  $\gamma$ -spinduliuotės kvantas arba antrinis elektronas iš dalelės pėdsako apsuptyes, dalelei praėjus per jutiklio medžiagą. Antrinių elektronų dozė priklauso nuo atstumo iki dalelės pėdsako trajektorijos (maždaug atvirkščiai proporcinga atstumo kvadratui). Vidutinei aktyvaus centro sudarymo tikimybei, kai tūryje sugerta dozė  $E(t)$ , apskaičiuoti yra įvedamas radialinis centro sudarymo tikimybės  $P(t)$  pasiskirstymas

$$P(t) = P(E(t)) = P[1 - \exp(-E(t)/E_0)], \quad (2)$$

kur  $E(t)$  yra vidutinė dozė, reikiama aktyvaus centro atstume  $t$  nuo dalelės pėdsako sudarymui. Dalelės pagavimo skerspjūvis  $\sigma$  apskaičiuojamas suintegravus (2) per visą antrinių elektronų išplitimo radiusą  $\tau$ :

$$\sigma = \int_0^{\tau} 2\pi P(t) dt. \quad (3)$$

Esant dalelių įtėkiui  $F$ , dalelės/cm<sup>2</sup>, signalas trumpame pėdsako segmente yra

$$S(D_i) = S_0 [1 - \exp(-\sigma F)]. \quad (4)$$

Santykinis dozometro efektyvumas ( $RE$ ) yra apibrėžiamas kaip jutiklio signalų santykis, apšvitinus jutiklį lygiomis elektringų dalelių ir  $\gamma$ -spinduliuotės dozėmis:

$$RE = S(D_i)/S(D_\gamma), \quad D_i = D_\gamma. \quad (5)$$

Santykinis dozometro efektyvumas, apskaičiuotas dalelės pėdsako segmente, taikant tiesinį artinį, yra:

$$RE \approx \sigma E_0 F / D_i. \quad (6)$$

Signalas (4) koreguojamas, įskaitant dozometro efektyvumą.

Storo alanino jutiklio atveju, atsako vidutinė vertė gaunama įvedus vidutines  $\sigma$  bei dalelės sustabdymo gylį  $L$  (arba kitaip, tiesinio energijos perdavimo, LET) vertes ir suintegravus per visą dalelės pėdsako ilgį  $T$ :

$$\sigma_{\text{vid}} R = \int_0^R \sigma dr = \int_{T_i}^0 (\sigma/L) dT, \quad (7)$$

$$L_{\text{vid}} = T_i / R. \quad (8)$$

Santykinis dozometro efektyvumas nustatomas susumavus visų sustabdytų antrinių elektronų indėlių.

Antrąjį dozometro jutiklį – monokristalinį didžiavaržį silicį (3) paveikus didelės energijos dalelėmis (pvz., hadronais) jo tūryje susidaro kristalografiniai defektai (jų koncentracija yra

proporcinga dalelių įtėkiui), kurie negrižtamai pakeičia fizines kristalo savybes, o būtent, krūvininkų rekombinacijos trukmę. Defektai sudaro fiksuoto skerspjūvio rekombinacijos centrus, kurių koncentracija įvertinama matuojant Si kristalo fotolaidumo parametrus. Krūvininkų momentinė gyvavimo trukmė  $\tau$  matuojama kaip nepusiausvirųjų krūvininkų tankio  $n$  kitimo laike  $t$  parametras

$$\tau = -n / \left[ \partial n / \partial t \right], \quad (9)$$

apibūdinantis krūvininkų tankio kitimo spartą fiksuotu laiko momentu. Krūvininkų rekombinacijos trukmė  $\tau_R$  yra susieta su rekombinacijos centrų koncentracija  $N_R$ , krūvininkų pagavimo skerspjūviu  $\sigma_R$  ir krūvininkų šiluminio judėjimo greičiu  $v_T$  taip:

$$\tau_R = \frac{1}{\sigma_R v_T N_R}. \quad (10)$$

Rekombinacijos centrų koncentracija, apšvitinus skvarbiaja aukštųjų energijų spinduliuote, yra pasiskirsčiusi tolygiai kristalo tūryje ir proporcinga dalelių įtėkiui  $F$ ,

$$N_R = \kappa F, \quad (11)$$

o proporcingumo koeficientas  $\kappa$  (radiacinės rekombinacijos centrų susidarymo sparta), klasterinio tipo radiaciniams defektams, susidarantiems apšvitinus kristalą hadronais, yra fiksuotas. Hadronų įtėkis yra apskaičiuojamas pagal formulę

$$F = \frac{1}{\sigma_R v_T \kappa \tau_R} = \frac{A}{\tau_R}. \quad (12)$$

Parametras  $A[\text{s}/\text{cm}^2]$  nustatomas iš kalibracinių matavimų kreivės, kai įtėkis yra matuojamas 1 MeV energijos neutronų ekvivalentinės pažeidos vienetais  $F_{1\text{MeV } n}$ .

Palyginus su analogu, šis apšvitos įtėkio bei dozės matavimo metodas bei jį realizuojantis įrenginys leidžia sparčiai matuoti nesąlytiniu būdu didelius apšvitos įtėkius plačiame intervale, tinka didelės apimties stebėsenos sistemoms, leidžia nustatyti spinduliuotės šaltinio lokalizaciją, yra kompaktiškas ir paprastos konstrukcijos.

## IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Aukštųjų energijų apšvitos didelių įtėkių bei dozių matavimo būdas, kuriame apšvitina alanino dozimetą ir matuoja laisvųjų radikalų koncentraciją apšvitintame dozimetre elektronų sukinių paramagnetinio rezonanso būdu, **besiskiriantis** tuo, kad papildomai, kartu su pirmuoju dozimetru apšvitina antrąjį dozimetą – monokristalinį silicį ir matuoja nepusiausvirųjų krūvininkų rekombinacijos trukmę, o apšvitos dozę ir spinduliuotės tipą įvertina apdorojė abiejų matuoklių duomenis ir įvertinę santykinį alanino dozometro efektyvumą.

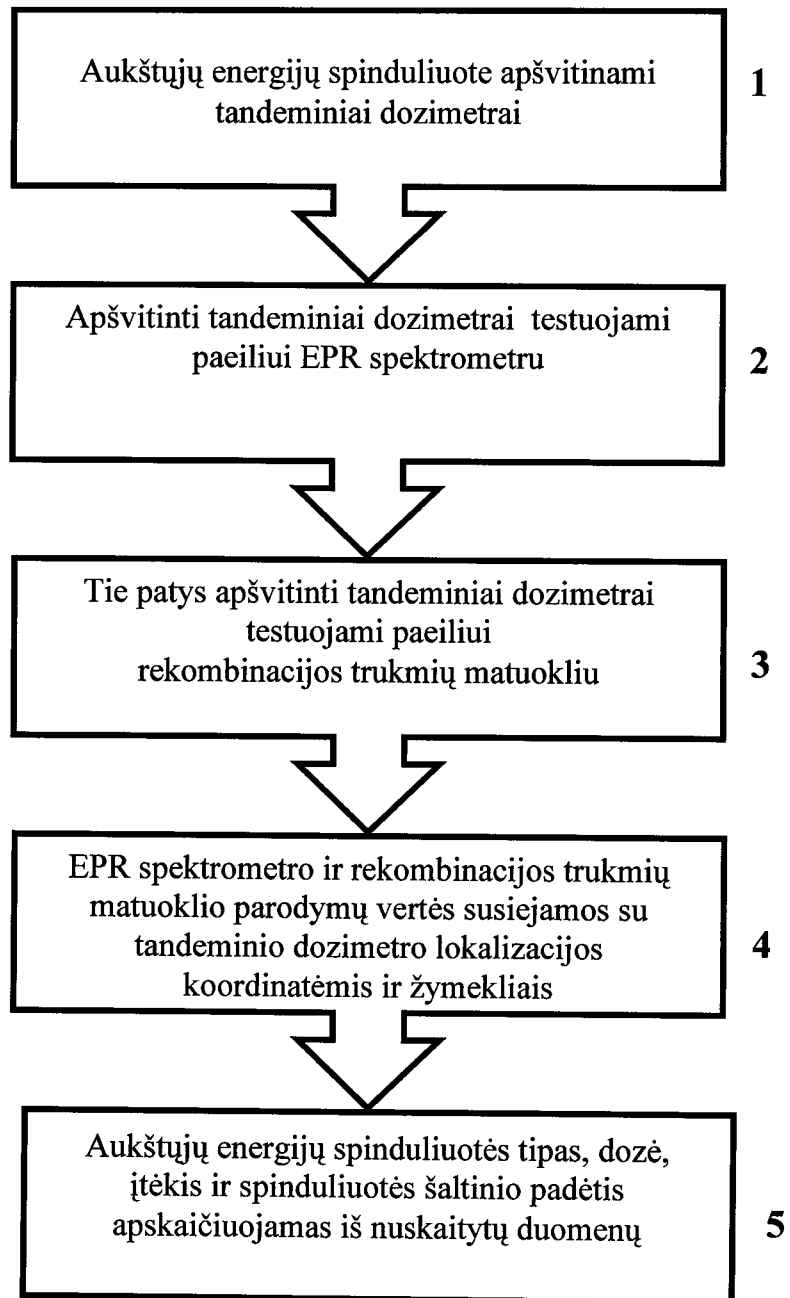
2. Aukštųjų energijų apšvitos didelių įtėkių bei dozių matavimo būdas pagal punktą 1, **besiskiriantis** tuo, kad antrojo dozometro nepusiausvirųjų krūvininkų rekombinacijos trukmę matuoja silicio kristalą paveikę trumpu lazerio šviesos impulsu, o jo fotoatsako relaksacijos spartą registruoja nesąlytiniu mikrobangų zondavimo būdu.

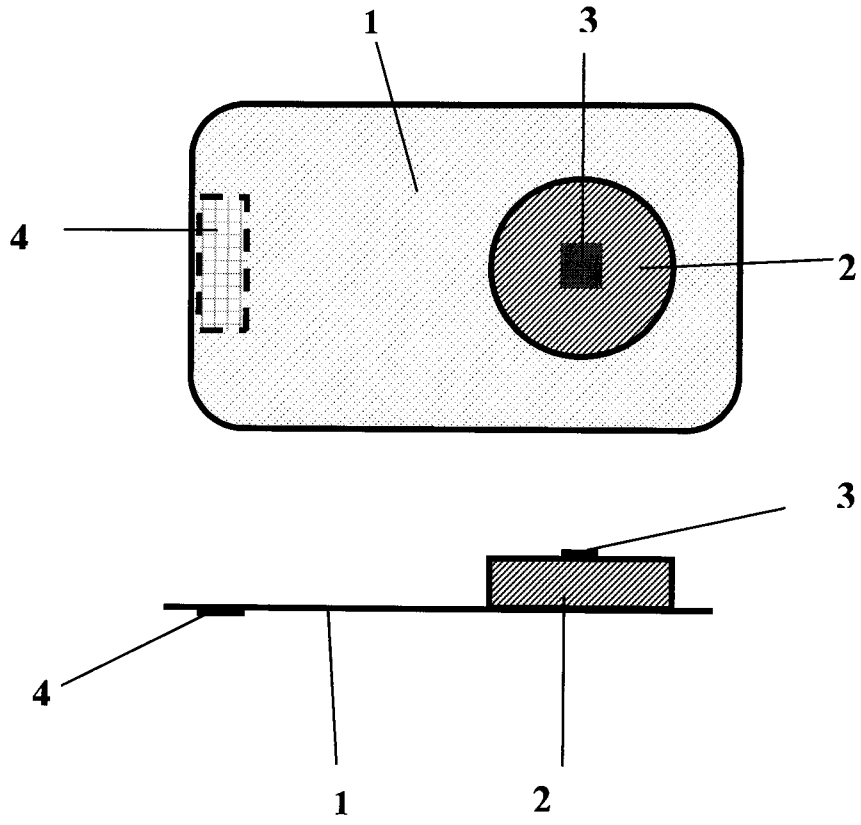
3. Aukštųjų energijų apšvitos didelių įtėkių bei dozių matavimo būdas pagal punktą 1, **besiskiriantis** tuo, kad dozimetrus išdėsto ir orientuoja taip, kad atskirų sistemos dozimetų parodymų kombinacija būtų selektyvi spinduliuotės šaltinio kryptčiai erdvėje, o apšvitinimo dozės pasiskirstymą įvertina iš sinchroniškai apšvitintų dozimetų parodymų.

4. Aukštųjų energijų apšvitos didelių įtėkių bei dozių matavimo įrenginys, susidedantis iš dozometro, jo laikiklio ir laikiklio identifikavimo žymeklio, **besiskiriantis** tuo, kad papildomai, toje pačioje laikiklio pusėje kaip ir alanino dozimetras, yra sumontuotas antrasis dozimetras, kurio matmenys, padėtis ir orientacija yra padaryti taip, kad abiejų dozimetų jutikliai sudarytų vieną tandeminių dozimetą.

5. Aukštųjų energijų apšvitos didelių įtėkių bei dozių matavimo įrenginys pagal punktą 4, **besiskiriantis** tuo, kad antrasis tandeminio dozometro jutiklis yra pagamintas iš silicio monokristalo, kurio paviršius yra padengtas pasyvuojančiu sluoksniu.

6. Aukštųjų energijų apšvitos didelių įtėkių bei dozių matavimo įrenginys pagal punktą 4, **besiskiriantis** tuo, kad pasyvuojantis kristalo sluoksniu yra padarytas pakankamo storio, kad išlaikytų reikiamą statinį elektrinį krūvį, būtų atsparus jonizuojančiai spinduliuotei ir būtų suderintas su silicio kristalo laidumo tipu.

**Fig. 1**



**Fig. 2**