



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2020 00592

(22) Data de depozit: 18/09/2020

(41) Data publicării cererii:
30/03/2022 BOPI nr. 3/2022

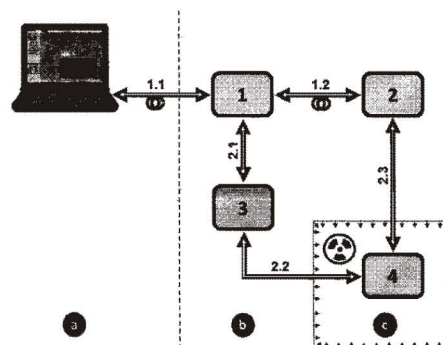
(71) Solicitant:
• INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETARE
- DEZVOLTARE PENTRU FIZICĂ ȘI
INGINERIE NUCLEARĂ "HORIA
HULUBEI"(IFIN-HH), STR. REACTORULUI,
NR.30, MĂGURELE, IF, RO

(72) Inventatori:
• PLĂCINTĂ VLAD-MIHAI,
ALEEA CRĂIEȘTI, NR.2, BL.A47, SC.F,
ET.3, AP.86, SECTOR 6, BUCUREȘTI, B,
RO;
• COJOCARIU LUCIAN-NICOLAE,
STR.IACOB ZADIK NR.1, BL.64, SC.C,
AP.11, ET.3, SUCEAVA, SV, RO

(54) SISTEM SCALABIL DEDICAT TESTĂRII ȘI MONITORIZĂRII
CIRCUITELOR INTEGRATE ÎN MEDII RADIOACTIVE

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un sistem de achiziție de date, scalabil și mobil, pentru testarea și evaluarea dispozitivelor electronice semiconductoare în prezența radiațiilor ionizante. Sistemul conform invenției este dispus în 3 zone, și anume: o cameră de control (a) destinată utilizatorului, unde este amplasat un calculator folosit la supervizarea procesului de testare și conectat prin fibră optică sau cablu de internet la o unitate (1) de procesare cu FPGA amplasată într-o zonă (b) experimentală și conectată prin fibră optică sau cablu de internet cu un circuit (2) periferic de comunicație și control și, prin intermediul unei conexiuni de mare viteză, cu un circuit (3) de interfațare pentru management și monitorizare a puterii electrice, și o zonă (c) localizată în mediu radioactiv în care este amplasat un circuit (4) prototip de testare a dispozitivului electronic care este controlat de circuitul (2) periferic de comunicație și control, printr-o conexiune de mare viteză, și este alimentat prin cabluri ecranate multifilare de către circuitul (3) de interfațare.



Revendicări: 2

Figuri: 1

Cu începere de la data publicării cererii de brevet, cererea asigură, în mod provizoriu, solicitantului, protecția conferită potrivit dispozițiilor art.32 din Legea nr.64/1991, cu excepția cazurilor în care cererea de brevet de invenție a fost respinsă, retrasă sau considerată ca fiind retrasă. Întinderea protecției conferite de cererea de brevet de invenție este determinată de revendicările conținute în cererea publicată în conformitate cu art.23 alin.(1) - (3).



Sistem scalabil dedicat testării și monitorizării circuitelor integrate în medii radioactive

Titular: *Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei (IFIN-HH)*

Inventatori: *Vlad-Mihai PLĂCINTĂ, Lucian-Nicolae COJOCARIU*

DESCRIERE

OFICIUL DE STAT PENTRU INVENȚII ȘI MĂRCI
Cerere de brevete de invenție
Nr. <i>a. 2020. 60. 572</i>
Data depozit <i>18. 02. 2020</i>

Invenția se referă la un Sistem de Achiziție Date (SAD) scalabil și mobil pentru testarea și evaluarea dispozitivelor electronice semiconductoare în prezența radiațiilor ionizante. Originalitatea sistemului constă în arhitectura sa versatilă ce poate fi configurată pentru măsurarea răspunsului la radiații ionizante a unei game foarte variate de dispozitive electronice semiconductoare discrete și mai ales a circuitelor integrate reprogramabile cu înalt grad de integrare. Datele sunt salvate prin monitorizarea concomitentă în timp real a diferitor parametri electrice, și a integrității firmware-ului (dacă e cazul) din dispozitivul iradiat plus a unor mărimi neelectrice caracteristice mediului folosind senzori, inclusiv a temperaturii în puncte de interes pe suprafața dispozitivului și a circuitului său de test. Întregul aranjament experimental este telecomandat în condiții de maximă radioprotecție pentru utilizatori. Extrapolarea comportării dispozitivului electronic în aplicația finală, cu fond de radiații ionizante, se face printr-o analiză coroborată și laborioasă a datelor culese în timpul testelor de iradiere.

Sondele spațiale, centralele nucleare, aparatura medicală, echipamentele militare și aeronautice, detectorii de particule pentru experimentele de fizica energiilor înalte și astrofizică dispun de sisteme electronice proiectate să funcționeze în medii agresive cu fond de radiații ionizante. Prin natura lor aceste aplicații necesită dispozitive electronice tolerante la radiații și cu funcționare fiabilă pe toata durata exploatării, fie că se bazează pe componente electronice special proiectate în acest sens sau pe cele comerciale existente pe piața de profil. În ambele cazuri este nevoie de o testare riguroasă și de o analiză minuțioasă a comportării lor atunci când sunt expuse la radiații ionizante. Aceste teste sunt costisitoare datorită complexității și a resurselor implicate, însă rămân singura soluție directă și viabilă pentru măsurarea rezistenței la radiații a dispozitivelor electronice pe lângă pachetele software de simulare (P.E. Dodd, Physics-based simulation of single-event effects, IEEE Trans. Device Mater. Reabil., vol. 5, pp. 343-357, 2005). Testarea se face în regim accelerat cu diferite tipuri de fascicul de radiație

INVENTATORI: *Vlad-Mihai PLĂCINTĂ, Lucian-Nicolae COJOCARIU*

Handwritten signature

Handwritten signature

extrase în aer sau într-o încălă cu vid, iar debitul dozei pe dispozitivul expus este mult mai mare decât în aplicația finală, însă doza cumulată este aceeași incluzând și un factor de siguranță la valoarea stabilită. Parametrii monitorizați permit identificarea efectelor cumulative și singulare induse de radiațiile ionizante. Efectele cumulative se manifestă în dispozitivul semiconductor printr-o deviere a parametrilor de funcționare de la valorile nominale din catalog odată cu creșterea dozei cumulate de radiație ionizantă (T.R. Olhan and F.B. McLean, Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices, IEE Trans. Nucl. Sci. m vol. 50, pp. 483-499, June 2003). Clasa efectelor singulare (SEE) cuprinde efecte tranzitorii, permanente și distructive cauzate de o singură particulă încărcată energetic ce străbat straturile semiconductoare ale dispozitivului (F.W. Sexton, Distructive single-event effects in semiconductor devices and ICs, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 50, pp. 603-621, 2003).

Obiectivul prezentei invenții este simplificarea măsurării rezistenței la radiații ionizante a componentelor electronice semiconductoare folosind un sistem unificat și scalabil, fapt ce elimină sau ameliorează o serie de dezavantaje întâlnite la soluțiile tehnice existente și descrise în literatura de specialitate (L. Salvy et al., Total ionizing dose influence on the single event effects sensitivity of active EEE, IEE-RADECS conf., DOI:10.1109/RADECS.2016.8093123, 2016).

Soluția la această problemă o constituie un Sistem de Achiziție Date în timp real ce are ca element central o Unitate de Procesare cu FPGA și blocuri periferice, anume: Circuit Periferic de Comunicație și Control, respectiv Circuit Interfațare pentru Management și Control Putere Electrică. Fiind proiectată în jurul unui FPGA (circuit integrat digital cu porți programabile), Unitatea de Procesare conferă un sistem scalabil prin: numărul mare de intrări/ieșiri digitale și analogice; multitudinea interfețelor de comunicație prevăzute și a blocurilor periferice ce pot fi introduse facil în arhitectura SAD. Toate aceste resurse sunt alocate prin firmware-ul FPGA-ului în raport cu cerințele de monitorizare pentru dispozitivul semiconductor supus testelor de iradiere. Reconfigurarea sistemului este nelimitată, inclusiv în timpul experimentelor prin intermediul interfeței grafice din calculatorul utilizatorului, fără vreo intervenție directă asupra părții hardware a standului experimental. Versatilitatea sistemului constă în posibilitatea testării atât a componentelor semiconductoare discrete cât și a circuitelor integrate cu înalt grad de integrare la scală nanometrică. Operarea SAD-ului permite personalizarea strategiei de monitorizare în conformitate cu complexitatea dispozitivului electronic supus iradierii. Totodată, arhitectura sistemului a fost proiectată astfel încât să fie una unificată, așadar să permită simultan eșantionarea parametrilor electrici, **INVENTATORI: Vlad-Mihai PLĂCINTĂ, Lucian-Nicolae COJOCARIU**

2/6

mărimilor neelectrice caracteristice (temperatură, umiditate, vibrații, câmp magnetic etc.), precum și integritatea firmware-ului plus a datelor din dispozitivul electronic iradiat. Multitudinea datelor rezultate sunt salvate în calculatorul utilizatorului cu marcă temporală pentru fiecare eșantion în scopul analizei ulterioare.

Modul de dispunere și interconectare a blocurilor funcționale din exemplul de realizat al invenției, respectiv și alte caracteristici specifice sistemului de test sunt evidențiate de următoarea descriere amănunțită, cu trimitere la figura anexată, în care:

Fig. 1. Prezintă aranjamentul experimental dispus pe 3 zone, cu spațiul destinat în Camera de Control (a) pentru utilizator și calculator folosit la supervizarea procesului de testare prin fibră optică sau cablu de internet (1.1) la Unitatea de Procesare cu FPGA (1) din Zona Experimentală (b), unde se mai află conectată la aceasta Circuitul Periferic de Comunicație și Control (2) prin fibră optică sau cablu de internet (1.2), respectiv Circuitul Interfațare pentru Management și Monitorizare Putere Electrică (3) prin conexiunea de mare viteză (2.1), iar Circuitul Prototip Testare Dispozitiv Electronic (4), localizat în mediul radioactiv (c), este controlat de (2) prin conexiunea de mare viteză (2.3) și alimentat prin cabluri ecranate multifilare (2.2) de către (3).

Arhitectura sistemului de monitorizare este dispusă pe zone, în funcție de gradul de radioprotecție, considerând constrângerile specifice facilităților de iradiere. În consecință, conexiunile dintre blocurile funcționale ale sistemului sunt lungi de ordinul metrilor sau a zecilor de metri. O atenție deosebită s-a acordat protocoalelor de comunicație și integrității semnalelor electrice. Conexiunile 2.2 și 2.3 pot fi prevăzute cu conectori de trecere în vid atunci când iradierea are loc în incintă cu vid, mai ales când se utilizează fascicol cu specii de ioni grei. Funcționarea sistemului a fost elaborată pentru monitorizarea îndelungată a dispozitivului electronic evaluat la distanță, în timp real, pe durata de dinainte și după iradiere, respectiv în timpul expunerii la radiații ionizante. Acest fapt implică preluarea de date experimentale pe parcursul a mai multor zile. Așadar, parametrii măsurati înaintea iradierii sunt considerați drept referință pentru interpretarea comportării dispozitivului electronic iradiat, în timp ce parametrii monitorizați după expunere constituie un alt set de date esențial pentru o interpretare riguroasă a comportării dispozitivului electronic în prezența radiațiilor ionizante. Totodată, acest fapt permite studierea fenomenelor care au loc la temperatura camerei și conduc la recuperarea funcționalității circuitului integrat (K. Dette, Total Ionizing Dose effects in the FE-I4 front-end chip of the ATLAS Pixel IBL detector, JINST 11, C11028, 2016).

INVENTATORI: Vlad-Mihai PLĂCINTĂ, Lucian-Nicolae COJOCARIU

3/6

Partea inovativă a sistemului de test este majoritar integrată în arhitectura Unității de Procesare cu FPGA. Ea este proiectată să permită monitorizarea cât mai eficientă a tuturor parametrilor disponibili de la componenta electronică semiconductoare supusă iradierii. Funcționarea Unității de procesare și alocarea resurselor hardware este strict dependentă de firmware-ul din FPGA bazat pe o arhitectura software centrală și funcționalități multiple ce pot fi lansate din interfața gradică din calculatorul utilizatorului. Rutina prin care se face achiziția datelor a fost gândită să fie în conformitate cu standardele de test în vigoare, anume pentru doză total ionizantă (TID) standardul (ASTM F1892, Standard Guide for Ionizing Radiation (Total Dose) Effects Testing of Semiconductor Devices), respectiv standardul pentru evenimentele singulare (JEDEC-JESD57 test standard, Procedures for the Measurement of Single-Event Effects in Semiconductor devices from Heavy-Ion Irradiation). Unitatea de Procesare a fost proiectată și implementată, spre deosebire de sistemul prezentat în această sursă bibliografică (V.M. Placintă et al., Test bench design for radiation tolerance of two ASICs, RJP, vol. 5-6 (5), 2017), să comunice direct datele calculatorului din Camera de Control, fără a mai fi necesar un al doilea calculator în Zona Experimentală. Majoritatea sistemelor de test existente sunt implementate pentru a evalua un anumit tip de componentă electronice semiconductoare, cum ar fi cel din referința (S. Uznanski et al, COTS FPGA/SRAM irradiation using a dedicated testing infrastructure for characterization of large component batches, MIXDES conf., DOI:10.1109/MIXDES.2014.6872223, 2014). Însă sistemul propus este versatil și resursele sale sunt alocabile pentru a permite testarea cu maximă eficiență a unei mari varietăți de dispozitive semiconductoare. Având arhitectura dezvoltată în jurul unui FPGA, sistemul descris dispune de resurse hardware net superioare, respectiv el este scalabil, față de alte soluții tehnice care folosesc sisteme de achiziție date comerciale sau unități de procesare cu microcontroler (M.H. Riaz, Single event-effects testing of Commercial Off-The-Shelf components, ICASE conf., DOI:10.1109/ICASE.2015.7489503, 2015). Caracteristicile tehnice întrunite de sistemul descris alcătuiesc o soluție unificată de evaluare a dispozitivelor semiconductoare complexe atunci când sunt expuse la radiații ionizante.

Circuitul Periferic Comunicație și Control prin conexiunea de mare viteză (2.3) asigură pentru dispozitivul semiconductor testat eșantionarea parametrilor electrici, iar când este necesar face programarea sau rescrierea regiștrilor de configurare și detecția erorilor din software (SEU - Single-Event Upset sau MBU – Multi Bit Upset) induse de radiațiile ionizante în dispozitivul electronic expus. Totodată, permite monitorizarea temperaturii în mai multe puncte de interes și a condițiilor de mediu în care se execută iradierea. Toate aceste informații

INVENTATORI: Vlad-Mihai PLĂCINTĂ, Lucian-Nicolae COJOCARIU

Placinta

Cojocariu

sunt utile pentru corelarea efectelor înregistrate și induse de radiațiile ionizante în dispozitivul electronic expus în condițiile existente de mediu, inclusiv variații de câmp magnetic. Din informațiile disponibile în literatura de specialitate, nu s-a mai identificat nici o astfel de arhitectură pentru această nișă de cercetare-dezvoltare. Acest bloc din arhitectura SAD-ului este configurabil la necesitățile dispozitivului electronic supus evaluării în prezența radiațiilor ionizante.

Circuitul Interfațare pentru Management și Monitorizare Putere Electrică, conectat la Unitatea de Procesare cu FPGA prin conexiunea de mare viteză (2.1), permite alimentarea într-o secvență predefinită de utilizator a dispozitivului electronic testat și monitorizează puterea consumată de acesta. În plus, el este prevăzut cu funcții de limitare a curentului consumat și compensarea căderii de tensiune pe cablurile multifilare ecranate (2.2). Acest bloc funcțional are 8 surse de alimentare independente cu tensiuni reglabile în plaja 0.5-12 V și debitează un curent maxim de 4 A pe fiecare ieșire. La pinii de alimentare ai circuitului integrat testat fiecare sursă compensează tensiunea nominală predefinită de utilizator, iar printr-o buclă de reacție asigură stabilitatea acestui parametru indiferent de curentul consumat. Această compensare a tensiunii de alimentare se face instantaneu, chiar dacă puterea livrată dispozitivului electronic se face prin fire lungi, iar variațiile de curent pot fi de tip treaptă când apare efectul cunoscut sub denumirea de SEL (Single-Event Latchup) indus de radiațiile ionizante și descris în (G.J. Hu, A better understanding of CMOS latchup, IEEE Trans. on Electronic Devices, vol. 31, pp. 62-67, 1984), sau din cauze ce țin de coruperea regiștrilor de configurare ai circuitelor integrate programabile, fără a neglija curenții de scurgere în straturile semiconductoare cu o creștere dependentă de doza total ionizantă (TID) conform (M. Backhaus, Parametrization of the radiation induced-leakage current increas of NMOS transistors, JINST 12, P01011, 2017). Interfața gradică din calculator asociată SAD-ului permite prin Unitatea de Procesare cu FPGA lansarea unei rutine specifice de masurare a SEL, atunci când dispozitivul electronic este iradiat cu specii de ioni grei pentru teste ce urmăresc identificarea acestui efect. Puterea consumată este monitorizată în timp real împreună cu alți parametri disponibili și odată depășite niște limite de consum, impuse de utilizator, sistemul sistează alimentarea dispozitivului electronic pentru a preveni defectarea lui prin ambalare termică necontrolată urmată de străpungere. Datele culese sunt analizate pentru determinarea susceptibilității dispozitivului semiconductor la SEL sau alte stări ce pot cauza un consum ridicat de curent neîntâlnite în condiții normale de funcționare. Unicitatea acestui bloc este dată de performanțele sale în conjuncție cu rutinele de evaluare la SEL, implementate în Unitatea de Procesare cu FPGA, ce sunt în acord cu

INVENTATORI: Vlad-Mihai PLĂCINTĂ, Lucian-Nicolae COJOCARIU



5/6



standardul specific de măsurare al acestui efect singular indus de radiațiile ionizante (JEDEC-JEP151, Test Procedure for the Measurement of Terrestrial Cosmic Ray Induced Destructive Effects in Power Semiconductor Devices).

Circuitul prototip Testare Dispozitiv Electronic se recomandă a fi proiectat de utilizatorul sistemului descris și trebuie să fie în conformitate cu specificațiile impuse de testare în câmp de radiații ionizante a dispozitivului electronic evaluat, respectiv de parametrii necesari a fi monitorizați. În general, se asigură o funcționare de bază a dispozitivului electronic ce urmează a fi expus, fără alte componente active adiționale în imediata sa apropiere. Acestea nefiind tolerante la radiații ionizante ar putea influența rezultatul măsurărilor. Dacă se optează pentru o placă electronică de complexitate ridicată sau comercială pentru dispozitivul testat, atunci se recomandă folosirea unui scut de protecție pentru a preveni iradierea accidentală a altor componente electronice din jurul aperturii ce permite expunerea doar a dispozitivului electronic supus testelor. Chiar și așa, rezultatul testelor poate fi adesea compromis din cauza toleranței foarte scăzute la radiațiile ionizante a componentelor active din jurul circuitului iradiat. În plus, monitorizarea dispozitivului electronic va fi deficitară prin faptul că nu se pot accesa toți pinii de interes și semnalele aferente acestora, mai ales pentru circuitele integrate complexe și număr mare de pini în capsule de tip LGA (Land Grid Array) și BGA (Ball Grid Array).

Salvate în fișiere de tip ASCII pe toată perioada testării și monitorizării, datele sunt ulterior analizate laborios într-o etapă distinctă. Analiza și interpretarea datelor este adaptată de la caz la caz și necesită pachete software de analiză numerică. Identificarea și cuantizarea efectelor induse de radiațiile ionizante se face prin coroborarea tuturor parametrilor mășurați. Astfel se disting și se izolează efectele la care dispozitivul electronic evaluat este susceptibil. Ultima etapă constă în extrapolarea comportamentului și a fiabilității dispozitivului semiconductor investigat la o aplicație concretă într-un mediu cu fond de radiații specific.

INVENTATORI: Vlad-Mihai PLĂCINTĂ, Lucian-Nicolae COJOCARIU



6/6



REVENDICĂRI

1. Produsul consituie un sistem scalabil dedicat testării și monitorizării circuitelor integrate cu aplicabilitate în mediile radioactive și pe baza căruia se face evaluarea lor conform standardelor în vigoare, iar soluția tehnică este parte dintr-o arhitectură de stand experimental telecomandat alcătuit din:
 - Unitate de Procesare cu FPGA versatilă prin capacitatea de a monitoriza un număr mare de parametri de funcționare pentru testarea unei game foarte variate de componente electronice semiconductoare cu înalt grad de integrare, respectiv este o soluție unificată de măsurare a parametrilor electrici și a mărimilor neelectrice pentru evaluarea rezistenței la radiații ionizante a dispozitivului iradiat.
 - Circuitul Periferic de Comunicație și Control configurabil la cerințele de eșantionare pentru parametrii electrici și software ai dispozitivului investigat, iar atunci când circuitul integrat impune prin arhitectura sa, acest bloc efectuează configurarea regiștrilor de programare și execută detecția erorilor software induse de radiațiile ionizante în dispozitivul expus;
 - Circuitul Interfațare de Management și Monitorizare Putere Electrică cu 8 surse de alimentare individuale, reglabile, monitorizate și telecomandate cu reacție pentru compensarea căderii de tensiune până la pinii de alimentare ai dispozitivului electronic evaluat, iar prin intermediul acestui bloc funcțional, cu rutină de măsurare și identificare a creșterilor de curent, se identifică efectele induse de radiațiile ionizante în dispozitivul iradiat ce este susceptibil la aceste fenomene.
2. Metodă de măsurare și identificare a efectului singular de tip SEL (Single Event Latchup) indus de radiațiile ionizante în dispozitivul electronic expus, fapt realizabil printr-o rutină de test și cu ajutorul unei părți hardware dedicate din arhitectura Sistemului de Achiziție Date, astfel fiind posibilă studierea acestui efect conform standardelor în vigoare, fără a compromite componenta evaluată, prin intermediul:
 - unui bloc de alimentare specializat și telecomandat ce asigură măsurarea supervizată a fenomenului, fără a duce dispozitivul electronic iradiat în zona ambalării termice necontrolate;
 - o rutină semi-automatizată de verificare și izolare a căilor de alimentare pentru dispozitivul electronic iradiat ce prezintă sensibilitate la SEL;

INVENTATORI: Vlad-Mihai PLĂCINTĂ, Lucian-Nicolae COJOCARIU

[Signature]

[Signature]

- modalități de confirmare a apariției SEL prin reconfigurarea regiștrilor circuitului integrat expus la radiații ionizante, respectiv prin cicluri de oprire-pornire secvențială a căilor de alimentare pentru sustragerea din amplitudinea evenimentului a curentului de scrugeri cauzat de doza total ionizantă (TID) în straturile semiconductoare, atunci când acest efect singular apare prin ionizare secundară, plus o secvență de scădere a tensiunii de alimentare sub limita de amorsare a structurii de tiristor parazit determinată de acest efect.

INVENTATORI: Vlad-Mihai PLĂCINTĂ, Lucian-Nicolae COJOCARIU



2/2



DESENE

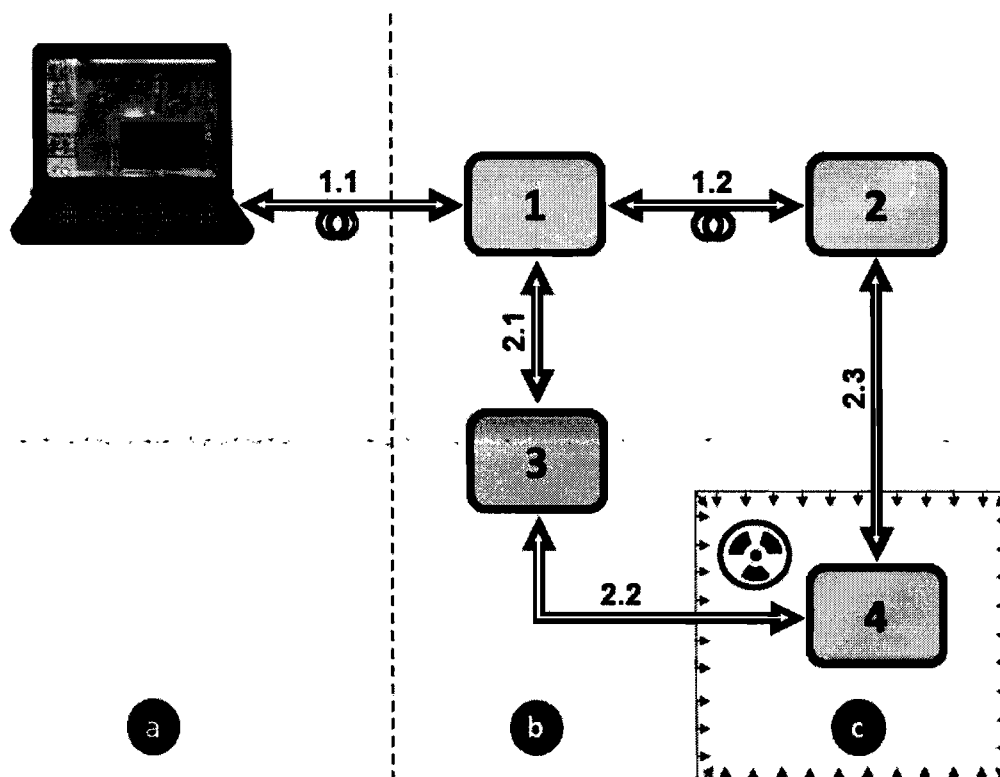


Fig. 1 Aranjament experimental pentru evaluarea dispozitivelor electronice
semiconductoare în prezența radiațiilor ionizante

INVENTATORI: Vlad-Mihai PLĂCINTĂ, Lucian-Nicolae COJOCARIU