



Universitatea "Ștefan cel Mare" Suceava

Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor

Domeniul: *Inginerie Electronică și Telecomunicații*

***Contribuții la testarea și caracterizarea dispozitivelor
electronice cu aplicații în experimentele
"Large Hadron Collider" (LHC)***

TEZĂ DE DOCTORAT

- Rezumat -

Conducător științific:

Prof. univ. dr. ing. Valentin POPA

Autor:

Ing. Lucian-Nicolae COJOCARIU

Comisia de îndrumare:

Prof. univ. dr. ing. Mihai DIMIAN

Prof. univ. dr. ing. Alin POTORAC

Conf. univ. dr. Aurelian ROTARU

Cuprins

Listă de abrevieri.....	iii
Introducere	1
1. Experimentul LHCb la CERN.....	3
1.1 Arhitectura detectorului LHCb	4
1.2 Sub-detectorii RICH și sistemul de fotodetecție	5
1.3 Programul de modernizare RICH	6
2. Efectele radiației în dispozitive semiconductoare	7
3. Multi Anode Read-Out Chip	9
3.1 Standul de test pentru iradierea MAROC3	10
3.2 Teste de iradiere cu fascicul de raze X	11
3.3 Concluzii și contribuții.....	13
4. Spatial Photomultiplier Array Counting and Integrating ReadOut Chip	15
4.1 Stand de test automatizat pentru iradiere	15
4.2 Test de iradiere cu fascicul de 200 MeV protoni	17
4.3 Concluzii și contribuții.....	20
5. FPGA pentru experimente de fizica energiilor înalte.....	23
5.1 Iradierea cu ion grei a FPGA-ului KINTEX-7	24
5.2 Teste de iradiere cu 200 MeV protoni	26
5.3 Concluzii și contribuții.....	27
Concluzii și contribuții personale	29

Listă de abrevieri

ADC	Analog to Digital Converter
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BiCMOS	Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor
BRAM	Block Random Access Memory
CERN	Organizația Europeană pentru Cercetare Nucleară
CLB	Configuration Logic Bloc
COTS	Commercial Off-The-Shelf
CRAM	Configuration memory
DAC	Digital to Analog Converter
DAQ	Data Acquisition
DD	Displacement damage
DRAM	Dynamic Random Access Memory
DUT	Device under test
EC	Elementary Cell
ECAL	Electromagnetic Calorimeter shashlik type;
FPGA	Field Programmable Gate Array
GBT	Giga-Bit Transceivers
GPIO	General-Purpose Input/Output
GUI	Graphical User Interface
HIF	Heavy Ion Irradiation Facility
HKMG	High K Metal Gate
HPD	Hybrid Photo Detector tube
I2C	Inter-Integrated Circuit interface
IC	Integrated Circuit
IFIN-HH	Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei
IT	Inner Tracker
JEM-EUSO	Japanese Experiment Module - Extreme Universe Space Observatory
JTAG	Joint Test Action Group interface
LET	Linear Energy Transport
LHC	Large Hadron Collider
LHCb	Large Hadron Collider beauty
LS2	Second Long Shutdown
M₁ - M₅	Muon station
MaPMT	Multi Anode Photomultiplier tube
MAROC	Multi Anode Read-Out Chip
MBU	Multibit Upset
MOS	Metal Oxide Semiconductor
NIL	Non-Ionizing Energy Loss
OT	Outer Tracker
PCB	Printed Circuit Board

p-e	photoelectron
PSI	Paul Scherrer Institute
RICH	Ring Imaging Cherenkov detector
SBU	Single Event Burnout
SEE	Single Event Effect
SEFI	Single Event Function Interrupt
SEGR	Single Event Gate Rupture
SEL	Single Event Latchup
SEM IP	Soft Error Mitigation Core
SET	Single Event Transient
SEU	Single Event Upset
SiO₂	Silicon dioxide
SMPS	Switching Mode Power Supply
SPACIROC	Spatial Photomultiplier Array Counting and Integrating Readout Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
T₁ - T₃	Tracking stations
TID	Total Ionising Dose
TMR	Triple Modular Redundancy
TS	Tracking System
TT	Trigger Tracker
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter interface
USB	Universal Serial Bus interface
VELO	Vertex Locator system
VLSI	Very Large Scale of Integration

Introducere

Aplicațiile de ultimă generație din domeniul comunicațiilor wireless, servicii de bandă largă, avionică, stații spațiale și detectori pentru experimentele de fizica energiilor înalte se bazează pe dispozitive semiconductoare de ultimă generație. Urmând legea lui Moore, numărul circuitelor VLSI compacte obținute a crescut ca rezultat al progresului remarcabil realizat în fizică și producția tehnologică a monocristalelor semiconductoare. Deteriorarea parametrilor electrici ai dispozitivelor semiconductoare este cauzată de imperfecțiuni structurale și de concentrația nesemnificativă de impurități. Funcționarea în medii ostile, în special în cele cu radiații ionizate, produc în semiconductor modificări ale proprietăților sale electro-fizice.

În decursul timpului, mai multe grupuri de cercetători au realizat studii extinse menite să evidențieze comportamentul dispozitivelor electronice în prezența radiațiilor ionizate, respectiv a fenomenelor fizice care au loc datorită expunerii semiconductorului la radiații. Progresul atins de fizica semiconductorilor toleranți la radiații ne permite să concepem dispozitive electronice rezistente în aceste medii extreme. Ciclul de viață al unui circuit semiconductor depinde de spectrul de particule și de distribuția energetică a câmpului radioactiv pentru fiecare mediu de radiație în parte. Aparatura electronică resimte efectele cauzate de radiațiile ionizante în medii precum: spațiu, centrale nucleare, detectori utilizați în experimentele fizicii energiilor înalte, inclusiv radiațiile induse în procesul de producție și fondul natural de radiații.

Experimentele din fizica energiilor înalte, în particular cele realizate pe "Large Hadron Collider" (LHC) la CERN, necesită dispozitive electronice capabile să funcționeze în câmpul mixt de radiații din interiorul tunelului acceleratorului, dar și în detectorii experimentelor. Prin urmare, un mediu ostil pentru aparatura electronică este cauzat de rata ridicată a particulelor cu o intensitate ridicată care vin, în general, de la interacțiunea principală hadron-hadron și de la materialul activat din mașina LHC. Câmpul mixt de radiații de la LHC constă în hadroni cu spectrul de energie începând cu 0.025 eV (neutroni termici) până la sute de GeV. Aceasta reprezintă o problemă constantă pentru electronica încorporată în infrastructura complexului de acceleratori de la CERN. Fondul de radiații din interiorul LHC are două surse principale, și anume: prima este dată de ciocnirea frontală a celor două fascicule proton-proton sau de plumb-plumb din interiorul detectorilor. În timp ce cea de-a doua sursă constă în pierderi ale fascicolului de-a lungul tunelului acceleratorului produse prin interacțiunea dintre protoni și gaze reziduale sau materiale aflate în apropierea liniei de fascicul.

În imediată proximitate a fasciculelor accelerate sunt elemente, precum: ferestrele de fascicul, colimatoare, sistemul de absorbție a energiei particulelor accelerate (punct de pierdere), creostate, magneți și cabluri. Toate aceste materiale interacționând cu fasciculul de protoni conduc la o cascadă hadronică alcătuită din particule secundare, precum: protoni, neutroni, pion, kaon, electroni și pozitroni rezultați din interacția principală. Din rândul acestor particule, câteva pot deține suficientă energie pentru a contribui la producția particulelor terțiare, fenomen ce poate continua atunci când particulele dețin suficientă energie.

Principala constrângere din punct de vedere tehnic pentru electronica și sistemele de control din complexul de acceleratori LHC este factorul dat de toleranța la radiații a dispozitivelor semiconductoare, mai exact a circuitelor de tip ASIC (Application Specific Integrated Circuits) sau a celor selectate de pe piața dispozitivelor electronice, uzual COTS (Commercial Off-The-Shelf).

Un program de modernizare este în desfășurare în cea de-a doua întrerupere a LHC-ului, generic denumita LS2 (Second Long Shutdown), programată pentru anul 2018, având ca principal scop îmbunătățirea performanțelor detectorilor LHC. Câțiva din sub-detectori aflați în detectorul LHCb vor fi modernizați, alături de cele doi sub-detectori RICH (Ring Imaging Cherenkov) ce vor fi reprojecțiați să funcționeze la o rata de trecere pentru un fascicul de protoni

egală cu 25 ns. Sistemul lor de fotodetecție va fi reproiectat folosind arhitectura electronică alcătuită atât cu dispozitive COTS, cât și cu ASIC-uri rezistente la radiații. Pentru această etapă a fost prevăzută o campanie de testare a rezistenței la radiații pentru dispozitivele electronice destinate a fi utilizate în sistemele de fotodetecție a sub-detectorilor RICH. Grupul LHCB România s-a implicat în această campanie de iradiere prin realizarea unor teste pe ASIC-ul MAROC3 și pentru un FPGA (*Field Programmable Gate Array*) din familia KINTEX-7 a producătorului Xilinx. Un al treilea cip, SPACIROC2, a fost investigat datorită faptului că are blocuri funcționale în arhitectura sa ce vor fi reutilizate în următoarea generație a familiei MAROC. Testele de iradiere au fost efectuate cu fascicule monoenergetice, iar rezultatele analizelor de date sunt prezentate în cele ce urmează. În plus, pentru fiecare cip rezultatele sunt extrapolate la condițiile nominale din detectorul LHCB.

Lucrarea de față prezintă studiul realizat pentru evaluarea toleranței la radiații a trei circuite integrate, unul fiind implementat în tehnologia 28 nm HKMG (High K Metal Gate), iar celelalte două în tehnologia de 0.35 μm SiGe BiCMOS.

Primul capitol oferă o imagine de ansamblu asupra infrastructurii de acceleratori de la CERN începând cu un scurt istoric privind organizarea și continuitatea programului de fizică și a celor patru mari experimente de pe inelul LHC. O descriere detaliată a detectorului LHCB este oferită, în special a sub-detectorilor RICH din programul de modernizare. Noul sistem de fotodetecție este prezentat alături de campaniile de iradiere pentru testarea unor circuite integrate.

Cel de-al doilea capitol prezintă efectele radiației în dispozitivele semiconductor împreună cu o imagine de ansamblu asupra terminologiei din domeniu. De asemenea, pe parcurs sunt date câteva tehnici de creștere a imunității la radiații pentru dispozitivele semiconductoare.

Capitolul trei descrie arhitectura cipului MAROC3, standul automatizat de test conceput, alături de modul de implementare în vederea realizării testelor de iradiere. Considerat o soluție de rezervă pentru plăcile de "front-end" a sistemul de fotodetecție din sub-detectorii RICH, acest circuit integrat este tolerant la radiații din proiectare și a fost trimis pentru testare. Câteva eșantioane au fost iradiate folosind un spectru continuu de raze X în intervalul 20-100 keV, iar vârful de 56 keV corespunzând catodului de tungsten. O secțiune specială a fost dedicată prezentării rezultatelor obținute în urma analizei și interpretării datelor.

Capitolul patru prezintă arhitectura cipului SPACIROC2 care servește drept referință pentru viitoarea generație de ASIC-uri din familia MAROC. Acest circuit integrat cu un consum redus de putere, a fost conceput pentru o aplicație spațială în vederea prelucrării semnalelor generate de tuburile fotomultiplicatoare (MaPMT) ce vor echipa telescopul JEM-EUSO (Extrem Universe Space Observatory). Moștenit de la MAROC3, standul de test a fost adaptat pentru monitorizarea în timp real a parametrilor electrici ai cipului SPACIROC2 în timpul testelor de iradiere. Toleranța acestuia la radiații a fost testată cu un fascicul de proton de 200 MeV, iar datele înregistrate au permis explicarea comportarea acestui ASIC în prezența radiației.

Capitolul cinci este dedicat măsurătorilor pentru testarea toleranței la radiații a unui FPGA din familia KINTEX-7 produsă de XILINX, propus ca principală componentă pentru placa digitală a sistemului de fotodetecție din RICH. Un stand de test a fost conceput, respectând constrângerile impuse de testarea în radiații, precum o procedură de subțiere a cipului în vederea efectuării testelor. Monitorizarea datelor cu ajutorul standului de test putând fi realizată și în interiorul vasului de iradiere. Datele obținute în urma testelor cu fascicul de ion grei și protoni a dispozitivului sunt prezentate.

1. Experimentul LHCb la CERN

Organizația Europeană pentru Cercetare Nucleară (CERN) găzduiește un complex de acceleratori unic împreună cu patru mari experimente: ATLAS, CMS, LHCb și ALICE. Un program extins de cercetare în fizica particulelor elementare este în curs de desfășurare, iar prin intermediul detectorilor se strâng cantități importante de date rezultate în urma coliziunii între fasciculele de protonilor sau a ionilor grei. Exploatarea potențialului maxim pe care îl poate oferi infrastructura LHC și îmbunătățirea datelor luate de la detectori va fi posibilă după a treia închidere de lungă durată (LS3) din 2025.

După încheierea în 2014 a LS1, mașina LHC a fost modernizată să funcționeze la energia sa nominală ce permite ciocnirea celor două fascicule, accelerate în sens invers, la o energie de 14 TeV. În prezent, complexul și schema, reprezentate în figura 1-1, a complexului de acceleratori de la ce CERN este formată din șase acceleratori și un decelerator.

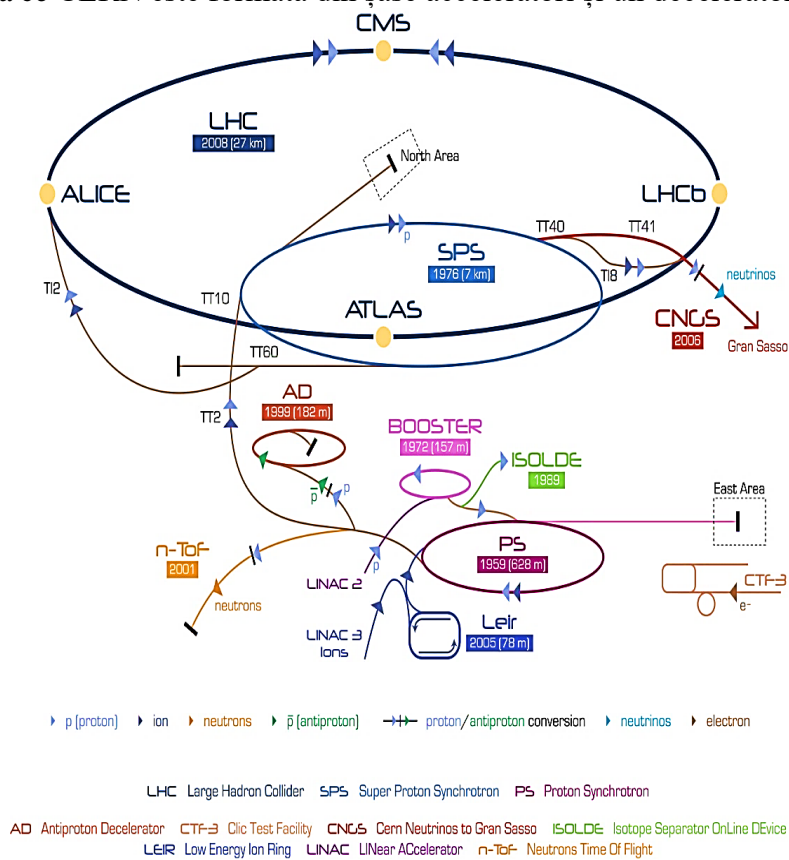


Figura 1-1 Complexul de acceleratori CERN.

Cele patru puncte de interacțiune, pe două inele ale mașini acceleratorului LHC, sunt asociate cu patru mari experimente care dețin următoarele acronime: ATLAS (A Toroidal Large Hadron Collider Apparatus), CMS (Compact Muon Solenoid), ALICE (A Large Ion Collider Experiment) și LHCb (Large Hadron Collider beauty).

LHCb este un experiment la LHC ce are drept scop cercetarea, în aria așa zisei fizici noi, dovezilor indirecte din încălcarea mecanismului Sarcină-Paritate CP (Charged-Parity), împreună cu măsurile precise a dezintegrărilor rare ale hadronilor "beauty" și "charm". O particularitate în diferențierea acestor hadroni de aroma grea din fond constă în durata lor lungă de viață, precum 1,51 ps pentru hadronul B și 0,41 ps pentru hadronul D^0 . Asemenea particule

parcurs doar câțiva milimetri în cele mai multe cazuri de dezintegrare ca urmare a impulsului mare de producție în combinație cu durata de viață.

Observând dezintegrarea unor astfel de particule s-a putut înțelege în profunzime structura materiei și a forțelor care guvernează lumea sub-atomică. Un an de date culese la LHCb, cu o luminozitate de $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, înseamnă aproximativ 10^{12} perechi de hadroni bb ce vor fi produși în 10^7 s din totalul timpului de funcționare al facilității. Un prim avantaj al funcționării detectorului LHCb la această modestă luminozitate este susținută de evenimentele ce au loc ca rezultat al unei singure interacții proton-proton. În consecință, datele sunt simplu de analizat comparativ cu situația în care mai multe interacții primare proton-proton au loc. Pe lângă acestea, la o luminozitate mică efectele radiațiilor ionizante sunt reduse în electronica din sub-detectorii care operează în apropiere de punctul de interacție sau de linia de fascicul.

1.1 Arhitectura detectorului LHCb

Experimentul LHCb este favorizat de arhitectura detectorului care joacă rolul unui spectrometru cu un singur braț având o acceptanță unghiulară pe direcția înainte pornind de la 10 mrad până la 300 mrad în planul de curbare a traiectoriei particulelor, în timp ce în planul fix de la 10 mrad la 250 mrad. Aflat în locația denumită "Point 8" a mașinii LHC, detectorul LHCb are o geometrie realizată din sub-detectori specializați în identificarea particulelor, reconstruirea traiectoriei lor și măsurarea momentului. O secțiunea transversală a detectorului LHCb este prezentată în figura 1-2 atribuind sistemului de coordonate ortogonal de mâna dreaptă cu axa Z de-a lungul liniei de fascicul și axa Y pe parcursul vertical.

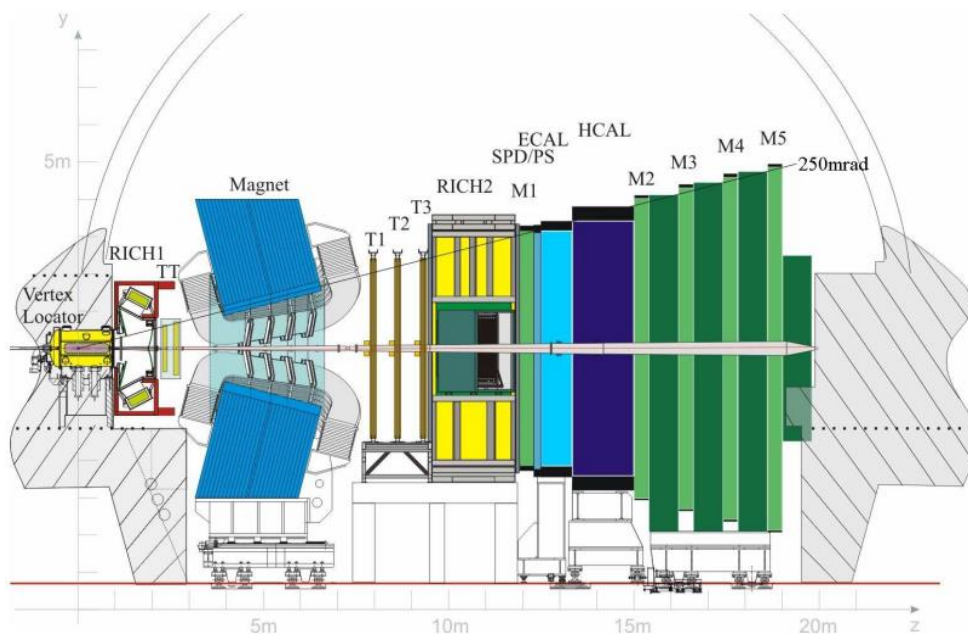


Figura 1-2 Secțiune transversală al unui detector LHCb.

În planul fix Y-Z este reprezentat un magnet bipolar, linia de fascicul, precum și sub-detectorii ce fac parte din "Tracking System" (TS) și Sistemul de Identificare al Particulei (PID). Părțile componente ale LHCb sunt:

- VELO – "the Vertex Locator system, including a pile-up veto counter";
- TT – "trigger tracker";
- T₁, T₂, T₃ – "tracking station consisting of Outer Tracker (OT) and Inner Tracker (IT)";

- RICH1, RICH2 – ”Ring Imaging Cherenkov sub-detectors”;
- SPD, PS – ”Scintillator Pad Detector and Preshower”;
- ECAL – ”Electromagnetic Calorimeter shashlik type”;
- HCAL – ”Hadronic Calorimeter”;
- M₁, M₂, M₃, M₄, M₅ – ”muon detection system”.

1.2 Sub-detectorii RICH și sistemul de fotodetecție

Un element esențial în programul de fizică de înaltă energie la LHCb este abilitatea identificării particulelor dezintegrate de tip b hadron. Particulele în starea finală sunt pionii, kaonii și protonii, în cazul acestor dezintegrări. Identificarea particulelor este realizată prin combinarea măsurării vitezei particulelor cu informațiile legate de momentul lor permițând mai departe calcularea masei individuale a particulelor. Sistemul de urmărire măsoară traseul particulelor cu traiectorie curbată de câmpul magnetic și, prin urmare, momentului lor. Pentru măsurarea vitezei sunt folosiți detectori Ring Imaging Cherenkov (RICH), cu principiul de funcționare bazat pe radiația Cherenkov. Efectul Cherenkov este dat de particulele încărcate care trec prin materialul dielectric cu o viteză mai mare decât viteza lumini în același mediu, fapt ce determină generarea de fotoni ca urmare a trecerii particulei prin acel mediu.

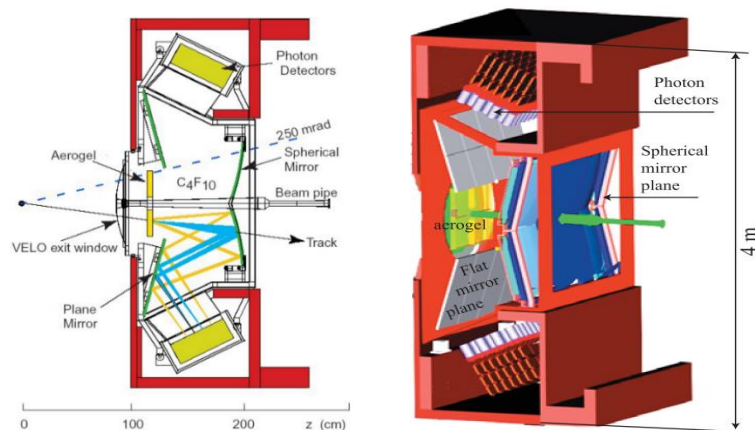


Figura 1-3 Secțiune transversală a arhitecturii sub-detectorului RICH1 (în stânga) și 3D (în dreapta).

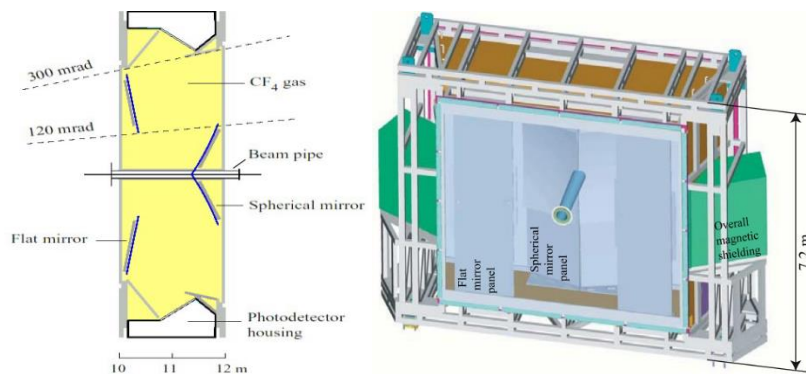


Figura 1-4 Arhitectura sub-detectorului RICH2 văzută de sus (în stânga) și reprezentarea ei 3D (în dreapta).

În sistemul de identificare a particulelor detectorul LHCb utilizează un lanț de două sub-detectoare RICH pentru a acoperi în întregime un interval de moment de la 1 GeV până la 150 GeV. Atât RICH1, cât și RICH2 se bazează pe același principiu de funcționare, conceput și tehnologie. Fotoni Cherenkov emiși într-un con, când un hadron încărcat trece prin materialul radiator, sunt focalizați cu oglinzi sferice, apoi reflectați folosind oglinzi plate pe planurile de fotodetecție situate dincolo de acceptanța detectorului LHCb. Ambii sub-detectori sunt echipați, individual, cu două planuri de fotodetecție. RICH1 are planurile de fotodetecție amplasate deasupra și sub linia de fascicul, vezi figura 1-3, în timp ce cele din RICH2 sunt situate în laterala acesteia, vezi figura 1-4. Fotoni Cherenkov din lanțurile sub-detectorilor RICH sunt colectați folosind zone mari de fotodetecție echipate cu tuburi hibride foto-detectoare (HPD).

1.3 Programul de modernizare RICH

Prevăzut să înceapă în 2018, programul de modernizare RICH implică reproiectarea sistemului de fotodetecție. Detecția fotonilor Cherenkov va fi implementată folosind o soluție comercială cu MaPMT. Toate dispozitivele semiconductoare ce fac parte din lanțul de achiziție pentru MaPMT și populează așa numitele plăci "front-end", respectiv plăcile digitale, trebuie să reziste la câmpul mixt de radiație din interiorul detectorului LHCb. Planurile de fotodetecție, populate cu MaPMT, vor beneficia de un sistem electronic de achiziție care va funcționa la frecvența de ceas a LHC-ului, și anume 40 MHz. O versiune preliminară a arhitecturii generale pentru sistemul de achiziție este prezentată în figura 1-5.

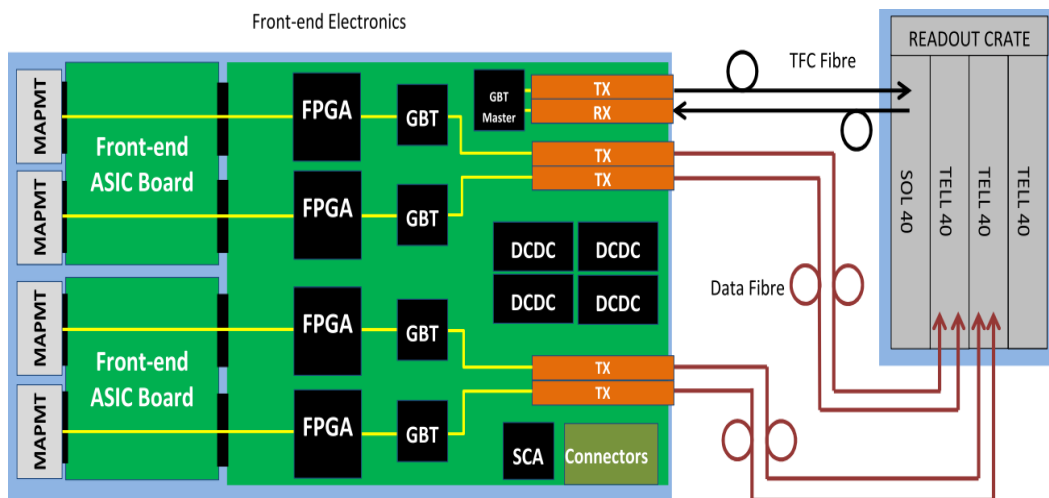


Figura 1-5 Noul sistem de achiziție al sistemului de fotodetecție pentru sub-detectorilor RICH și modulele de citire date TELL40s.

Plăcile "front-end" folosite la discretizarea semnalelor generate de MaPMT și transmiterea mai departe, de către ASIC, a datelor ce vor fi supuse unei proceduri de formatare, efectuată de placa digitală, pentru a îndeplini cerințele cerute de protocolul transmisiunii pe fibră optică giga bit GBT. Mai apoi, datele sunt trimise prin fibre optice în camera de numărare unde se află modulele de recepție TELL40. Scopul acestui modul de bază TELL40 FPGA fiind sortarea datelor venite de la fiecare sub-detector înaintea de a ajunge la ferma de calculatoare. În final, datele culese de la ambii sub-detectori RICH ajung la ferma de calculatoare ce realizează reconstrucția evenimentului, filtrarea datelor și stocarea acestora.

2. Efectele radiației în dispozitive semiconductoare

În experimentele LHC cele două fascicule de protoni se ciocnesc frontal la un interval de 25 ns lăsând în urmă un mediu de radiație agresiv. Aplicațiile și echipamentele electronice utilizate în fizica energiilor înalte, avionică, sonde spațiale și aplicații militare necesită dispozitive electronice tolerante la radiații pentru a putea funcționa corespunzător în mediile cu radiație. Diferite tipuri de efecte induse de radiație pot avea loc în structura cristalină a dispozitivele semiconductoare în funcție de tipul de particule care trece prin structura și energia lor cinetică. Aceste efecte sunt clasificate în două grupe, prima, reprezentată de efectele cumulative, apare gradual datorită acumulării dozelor de radiații ionizante în timp. Cel de-al doilea grup al efectelor singulare, "Single-Event Effects" (SEE), poate fi declanșat de o singură particulă foarte ionizată ce cauzează o depunere foarte localizată de sarcină electrică în straturile semiconductoare.

O vedere de ansamblu al efectelor induse de radiații este prezentată în figura 2-1, iar fiecare efect va fi prezentată în detaliu în rândurile care urmează.

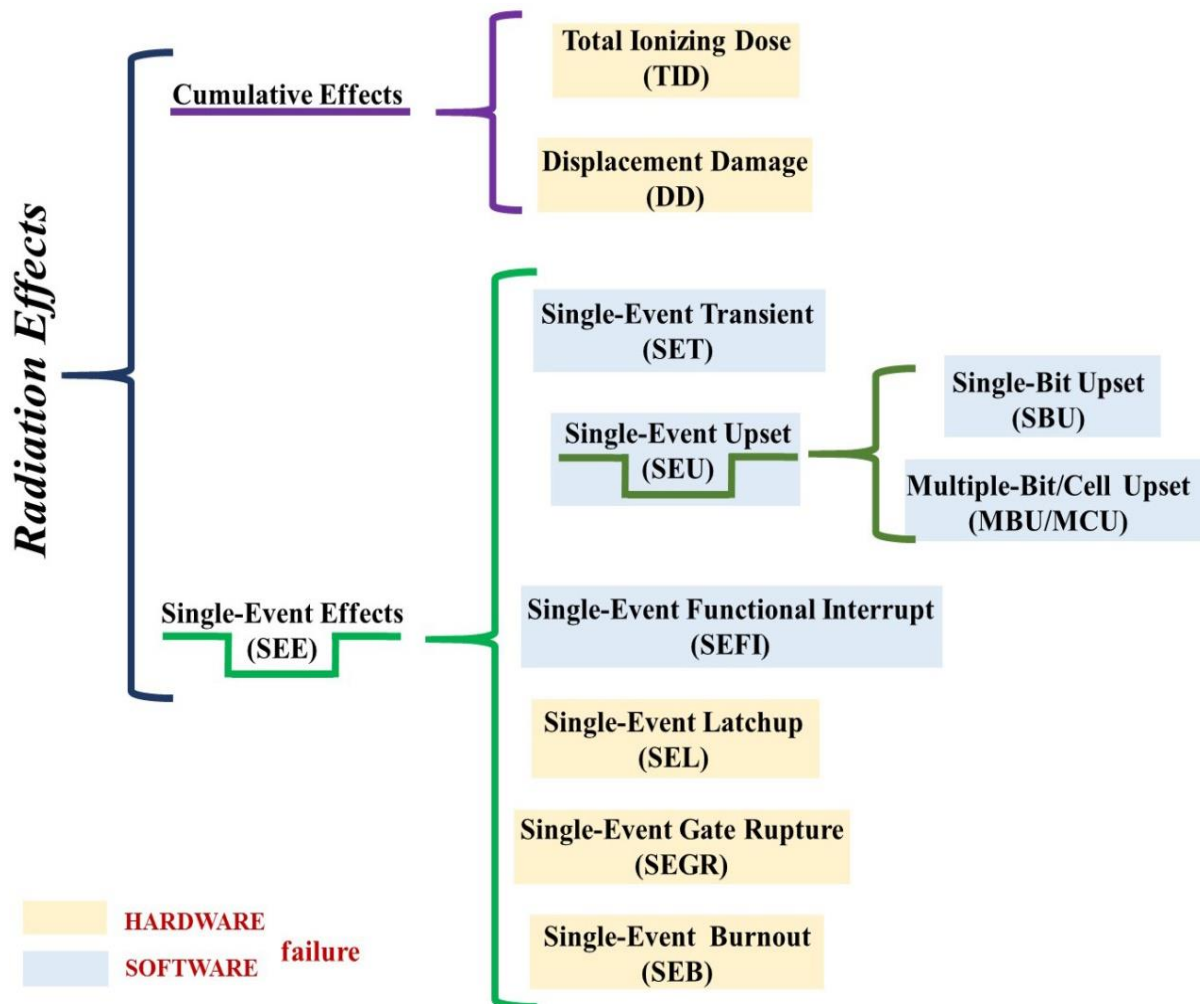


Figura 2-1 Efectele induse de radiație în dispozitive semiconductoare.

Pierderea non-ionizantă de energie NIEL (Non-Ionizing Energy Loss) este un proces fizic guvernat de pierderea energie de către particulele care trec prin materialul respectiv și cauzează dislocarea atomilor din rețeaua cristalină a materialului. Ioni generați prin NIEL pot interacționa cu nucleul și nu cu învelișul electronic al atomilor din rețeaua cristalină. Această interacțiune poate fi elastică sau neelastică în urma căruia rezultă nuclee reziduale, protoni și electroni.

"Displacement damage" (DD) este un proces declanșat în principiu de particule neutre, de exemplu neutroni, ce conduce la dislocarea atomilor sau chiar la o avalanșă de dislocări a atomilor din structura semiconductoare a dispozitivului.

Doza Total Ionizantă TID ("Total Ionising Dose") afectează în principiu dispozitivele din tehnologia MOS, în special substratul și proprietățile stratului izolator prin formarea de centre capcană și procese de interfață.

Eveniment singular de tip SET (Single Event Transient) este de fapt o perturbare rapidă în curent sau tensiune ca urmare imediată a parcurgerii structurii semiconductoare de către o particulă.

Eveniment singular de tip SEU (Single Event Upset) este un fenomen ce duce la schimbarea stării logice sau a unui eveniment de tip SET interpretat drept semnal valid în celulele de memorie semiconductoare, deci o schimbare de bit logic

Eveniment singular de tip MBU (Multi Bit Upset) este cauzat de o singură particulă foarte energetică ce poate declanșa mai multe evenimente SEU fie în celulele atât SRAM, cât și în DRAM sau altă tehnologie de stocare pe bază de semiconductor.

Eveniment singular de tip SEFI (Single Event Function Interrupt) este un fenomen ce apare în circuitele integrate complexe și se manifestă ca o perturbare în modul normal de funcționare a dispozitivului ca urmare a lovirii unui volum semiconductor sensibil din arhitectura sa de către o particulă foarte energetică.

Eveniment singular de tip SEL (Single Event Latchup) conduce la o curgere regenerativă de curent, condiție declanșată de o structură de tiristor format din două tranzistoare parazite, prin urmare o cale de rezistență minimă se formează între căile de alimentare ale circuitului integrat când acesta este lovit de o particulă încărcată energetic ce depune suficientă sarcină în structura semiconductoare punând în stare de conducție structura parazită.

Eveniment singular de tip SEGR (Single Event Gate Rupture) se declanșează în tranzistoarele MOS și cauzează o străpungere localizată a materialului dielectric din poarta tranzistorului atunci când un singur ion greu încărcat energetic lovește regiunea porții.

Eveniment singular de tip SEB (Single Event Burnout) este un mecanism de distrugere completă a dispozitivului întâlnit în mod special atât în tranzistoarele de putere MOSFET, cât și în cele bipolare atunci când sunt expuse la ioni grei, neutroni și protoni.

3. Multi Anode Read-Out Chip

Centrul pentru dezvoltarea și proiectarea dispozitivelor microelectronice CNRS-IN2P3-Ecole Polytechnique sau pe scurt OmegaMICRO dispune de gamă largă de ASIC-uri dedicate părții de "front-end" a detectorilor și senzorilor din domeniul experimentelor de astrofizică, fizica particulelor elementare și nucleară, alături de imagistica medicală. Una dintre aceste serii este familia de cipuri Multi Anode Read-Out (MAROC) concepută pentru discretizarea semnalelor de la MaPMT sau unei tehnologii similare de foto-detectori. În contextul programului de modernizare LHCb, MAROC3 a fost considerat ca soluție de rezervă pentru "front-end" cei doi sub-detectori RICH.

Cipul MAROC3 a fost implementat în tehnologia AMS SiGe 0.35 μm cu un consum de putere de 3,5 mW/canal, a se vedea arhitectura bloc în figură 3-1. Acest ASIC este dedicat, în principiu, să citească cele 64 de canale ale MaPMT-ului. În privința performanțelor stabilite prin design, MAROC3 a fost implementat: să corecteze dispersia de fabricație a MaPMT-ului de la canal la canal; să genereze 64 de semnale trigger corespunzătoare celor 64 de anodi ai tubului fotomultiplicator; să proceseze cu o eficiență de trigger de 100% semnalele începând cu 50 fC sarcină electrică (echivalentul unui 1/3 foto-electron) și maxim până la 1,6 pC, interferență de 1% între canale și de zgomot de 2 fC.

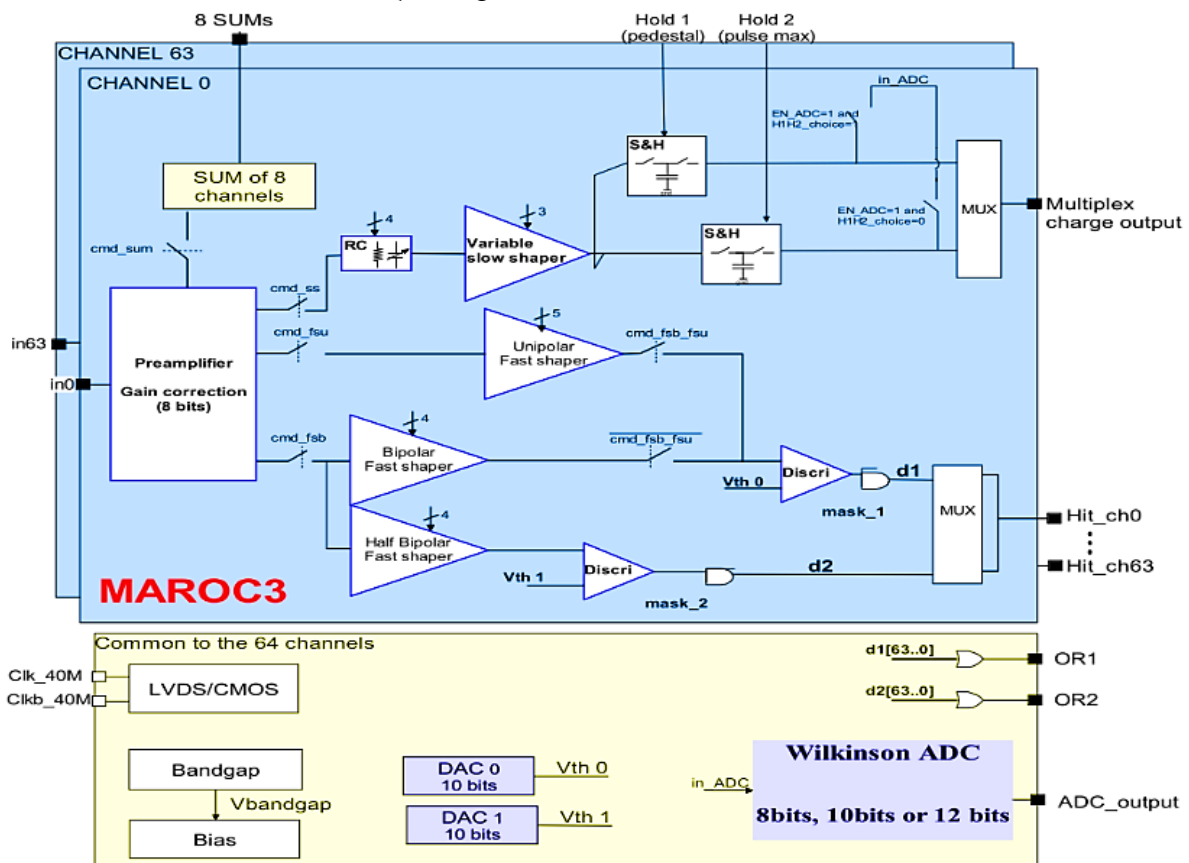


Figura 3-1 Schema bloc pentru ASIC-ul MAROC3.

3.1 Standul de test pentru iradierea MAROC3

În pregătirile pentru procedura de testare la radiații a cipului MAROC3, pentru câmpul mixt de radiații din sub-detectori RICH, parametri nominalizați pentru monitorizare au fost stabiliți de comun acord de grupul român LHCb și de grupul ce a proiectat a ASIC-ului. Procedura adoptată implică monitorizarea parametrilor pentru MAROC3 enumerați în tabelul 3-1. Primă listă de parametri trebuie monitorizați înainte și după fiecare doză de radiație depusă, în timp ce a doua listă este monitorizată pe parcursul depozitări dozei. O analiză ulterioară a fiecărui parametru înregistrat poate scoate în evidență semne ale efectelor induse de radiații. Prin corelarea evoluției parametrilor înregistrați în timp se poate face diferența între diferitele tipurilor de efecte induse de radiații și izolarea blocului funcțional din cip unde se manifestă.

Tabelul 3-1 Lista parametrilor monitorizați în timpul studiilor de iradiere pentru MAROC3

înainte/după iradiere	în timpul iradierii
<ul style="list-style-type: none"> • Liniaritate DAC 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tensiune de prag/ ieșire DAC
<ul style="list-style-type: none"> • Curbele de eficiență (Scurves) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Puterea consumată de cip
<ul style="list-style-type: none"> • Puterea consumată de cip 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tensiunea internă referință (Vbandgap) a ASIC-ului
<ul style="list-style-type: none"> • Tensiunea internă referință (Vbandgap) a ASIC-ului 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Componenta continuă de tensiune a etajelor "Slow/Fast Shaper"
<ul style="list-style-type: none"> • Componenta continuă de tensiune a etajelor "Slow/Fast Shaper" 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura cipului și a PCB-ului
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura cipului și a PCB-ului 	

Pentru monitorizarea parametrilor și colectarea datelor în timpul testelor de iradiere a fost luat în calcul faptul că sistemul de achiziționare (DAQ) și celelalte echipamente electronice trebuie să fie la distanță de dispozitivul sub test (DUT), în acest caz cipul MAROC3. Prin urmare, toate firele conectate la placa DUT sunt împărțite în două și echipate cu conectori care se potrivesc cu cei instalați pe vasul pentru iradiere. Utilizatori supraveghează și operează totul din camera de control. Am propus și implementat un stand automatizat de teste în vederea testării rezistenței la radiații a cipului MAROC3 adecvat pentru testele propuse spre a fi efectuate la facilitățile de iradiere cu protonilor grei, neutronilor și raze X. Schema dezvoltată pentru standul automatizat de teste MAROC3 este prezentat în figura 3-2.

Fiecare dintre echipamentele standului de teste este conectat la PC-ul din camera de iradiere printr-o interfață USB, iar mai departe utilizatorul are acces la datele colectate prin intermediul PC-ului din camera de control conectat prin Ethernet la cel din camera de iradiere. Placa DUT-ului este alimentată printr-un cablu ecranat multifilar lung de 4 m de la o sursă de alimentare comandată. Aceasta a fost realizată de grup nostru pentru a deservi acestor teste. Generatorul de pulsuri, alături de osciloscop sunt dedicate realizării testelor de eficiență de trigger sau Scurves. Cu ajutorul unui generatorului AFG3102 sau emulat semnale provenite de la MaPMT menținând constantă sarcina de intrare pentru toate cele 64 de canale ale DUT-ului. Semnalele rezultate sunt verificate cu osciloscopul. S-a ales drept sistem DAQ o soluție comercială, și anume NI DAQ6009. Sursa de alimentare este conectată la sistemul DAQ fapt ce permite întreruperea ieșirilor sale de tensiune.

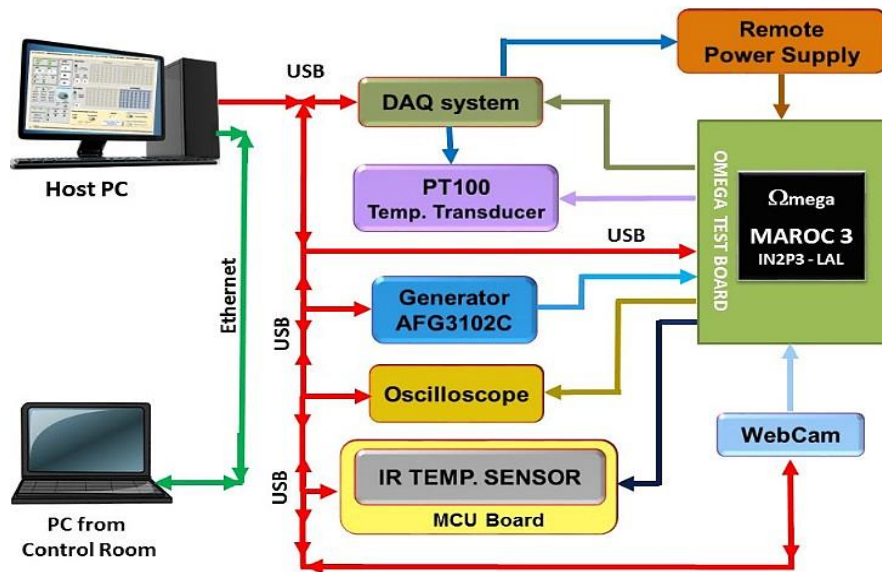


Figura 3-2 Arhitectura standului de teste pentru monitorizarea online MAROC3.

3.2. Teste de iradiere cu fascicul de raze X

Un prim test pentru verificarea toleranței la radiații a MAROC3-ului a fost realizat cu ajutorul unui generator de raze X disponibil la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei (IFIN-HH). Aranjamentul experimental pentru iradierea cu raze X este prezentat în figura 3-3. Profilul fascicului de raze X este în formă de evantai de $80^\circ \times 10^\circ$ cu maxim de 56 keV. Placa de test a cipului MAROC3 a fost amplasată la 10 cm în fața suprafeței monobloc a generatorului, între fiind introdusă o mască de plumb de 5 mm grosime. Aceasta a asigurat protecția la raze X pentru restul dispozitivelor electronice aflate pe placa DUT, în timp ce cipul MAROC3 a fost iradiat printr-o apertură pătrată de 5 cm. Sensorul de temperatura în infraroșu fără contact a fost folosit pentru a verifica temperatura de pe pastila semiconductoare a cipului. Toate aceste elemente pot fi regăsite în partea dreaptă a figurei 3-3.



Figura 3-3 Standul de teste MAROC3 instalat în generatorul de raze X.

Pe de altă parte, toată electronica pentru monitorizare și echipamentele de control au fost amplasate departe de sursa cu raze X, fapt care poate fi observat din partea stângă a figurei 3-3.

Standul de teste a fost controlat de la distanță din camera de control. Procedura de iradiere a fost planificată cu următoarele doze preliminare: 40 krad, 400 krad, 1 Mrad, 2,5 Mrad.

Înainte de iradierea cu raze X a celor două cipuri, o caracterizare amănunțită a fost realizată în laborator din punctul de vedere al parametrilor electrici. Parametrii rezultații au fost utilizați ca referință în testele ce au urmat. După instalarea standului de test la facilitatea de iradiere, fiecare cip a fost monitorizat timp de 30 de minute în apropierea generatorului cu raze X fără fascicol. Apoi cu fascicol, pentru fiecare doză depusă am realizat un set complet de măsurători respectând parametrii din tabelul 3-1. Analiza datelor a fost realizată pentru ambele cipuri testate în detaliu și s-a constatat un comportament asemănător pentru ele în timpul iradierii. Nu au fost înregistrate schimbări în parametrii monitorizați pentru MAROC3 în timpul testelor de iradiere. Temperatura din interiorul incintei de iradiere a generatorului de raze X a crescut de la 21 °C la 29 °C, vezi figura 3-7, fapt datorat disipării de căldură pe filamentul de tungsten al tubului de raze X și a celorlalte elemente ale mașini. După vârful de 29 °C, temperatura în interiorul incintei a scăzut încet datorită variației temperaturii diurne.

O analiză atentă a parametrilor electrici a evidențiat că tensiunea de alimentare a DUT-ului nu a suferit nici un fel de variații considerabile, în timp ce curentul consumat de cip a crescut la finalul dozei de 2,5 Mrad cu 1,5%. Nici un eveniment de tip SEL nu a fost observat în consumul de curent.

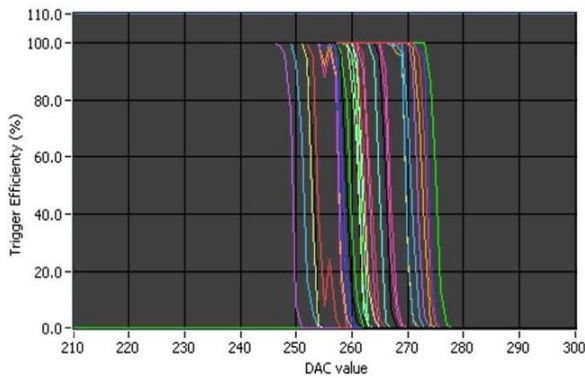


Figura 3-4 Scurves MAROC3 înainte de iradiere.

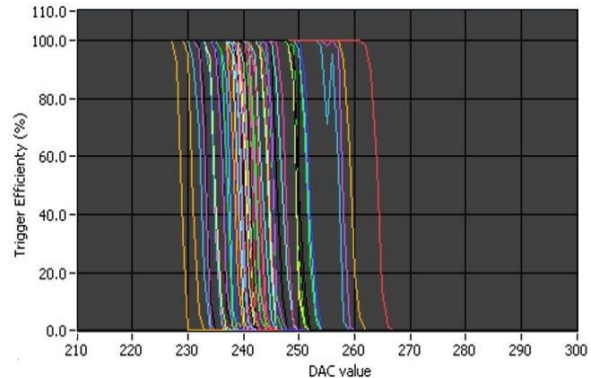


Figura 3-5 Scurves MAROC3 după o doză de 1 Mrad raze X.

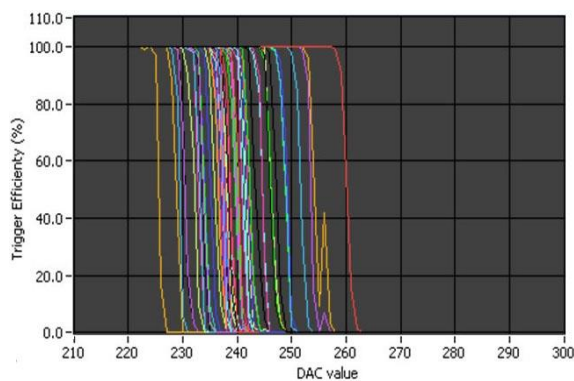


Figura 3-6 Scurves MAROC3 după o doză de 2,5 Mrad raze X.

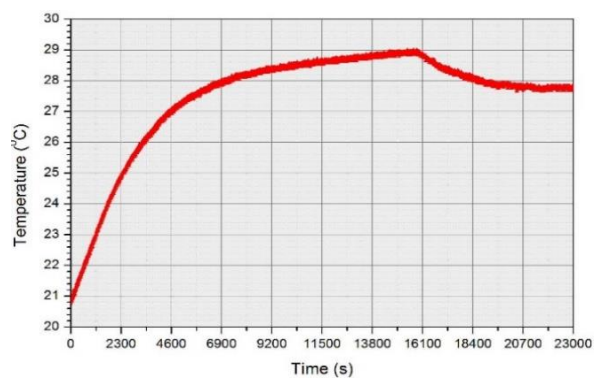


Figura 3-7 Variația temperaturii în interiorul mașini cu raze X în timpul testelor.

Tensiunea de ieșire pentru DAC0 a rămas liniară la fiecare doză, fără a avea loc vreo fluctuație locală. Curbele de liniaritate pentru DAC0 se suprapun perfect până la 0,9 V (valoare 650 încărcată în registrul convertorului) cu cele măsurate înainte de aplicarea dozelor de raze X. Mai jos de această valoare curbele încep ușor să nu se mai suprapună. Referința internă de

tensiune V_{Bndgap} încep să scadă la 2,5 Mrad, totuși cu o fluctuație mai mică de 2%. Alți parametri, precum componenta DC a Slow Shaper-ului sau cea a Fast Shaper-ului nu prezintă variații însemnate.

Graficele asociate testelor de Scurves (curbele de eficiența trigger-ului de la figura 3-4, inclusiv figura 3-6) au fost determinate înainte și după fiecare doză de radiație aplicată. O sarcină de intrare de 150 fC a fost aplicată la toate 64 de canale analogice din MAROC3, rezultatele au subliniat că de la doză la doză există un trend de deplasare și împrăștiere a Scurves. Chiar și în acest context, cipul a funcționat în limitele parametrilor nominali în ciuda dozele mari de TID aplicate. Testate în laborator din nou după iradierii, cele două cipuri MAROC3 nu au prezentat schimbări ne semnificative, iar micile variații observate la parametrii electrici în timpul iradierii au fost, cel mai probabil, cauzate de schimbarea temperaturii și nu de TID. În ansamblu, MAROC3 s-a dovedit a fi stabil din punct de vedere al funcționării în timpul testelor cu raze X. Totuși, un studiu termic dedicat trebuie realizat pentru a înțelege mai bine cum parametri cipului variază cu temperatura, în special pentru mediile ce au fluctuații considerabile de temperatură.

3.3 Concluzii și contribuții

Grupul LHCb România a realizat primul test de iradiere al unui cip MAROC3 prin evaluarea toleranței la radiații de tip TID cu un fascicul de raze X la 56 keV. Pe viitor au fost prevăzute teste de iradiere cu protoni și ioni grei. Acest test preliminar cu raze X a fost punctul de plecare al viitoarelor teste din campania de iradiere planificată pentru MAROC3. De asemenea, vulnerabilitatea ASIC-ului la diferite tipuri de efecte singulare SEE trebuie verificată cu atenție fiind obligatoriu ca acesta să fie imun la SEL pentru ioni grei cu un LET sub 15 MeV cm^2/mg , în timp ce pragul LET se dorește a fi cât mai ridicat, peste 70 MeV cm^2/mg . În acest context, toleranța cipului la un fascicul de protoni cu o energie de peste 20 MeV trebuie să fie obligatorie. Doza finală va fi 8 Mrad pentru TID, alături de o energie a fasciculului de proton mai ridicată va crește probabilitatea ca DD și SEE să aibă loc. Prin urmare, trebuie investigată posibilitatea unor efecte permanente induse de protoni.

Strânsa colaborare cu proiectanții ASIC-ului din OmegaMICRO ne-a ajutat să dezvoltăm nu doar o strategie viabilă de monitorizare a cipului, dar și să înțelegem mai bine modul de operare a ASIC-ului. În această situație, grupul nostru a propus și implementat un stand de test automatizat pentru monitorizarea sub radiații a cipului MAROC3. Alte informații ne-au fost oferite de membri grupului LHCb implicați în testarea toleranței la radiații a cipului CLARO.

Fiabilitatea standului de test a fost confirmată de funcționarea sa stabilă pe o perioadă îndelungată, chiar și în această împrejurare sistemul DAQ nu s-a potrivit cerințelor noastre. Cel mai probabil un sistem personalizat DAQ va fi implementat pentru testele viitoare. El va avea prevăzut filtre anti-aliasing și buffere de tensiune pentru fiecare canal. În ciuda faptului că fost folosit doar cablu ecranat, aproximativ 4 m lungime, trebuie luată în calcul influența zgomotului de eșantionare pentru viitorul sistem DAQ.

4. Spatial Photomultiplier Array Counting and Integrating ReadOut Chip

Acronimul SPACIROC2 vine de la ”Spatial Photomultiplier Array Counting and Integrating Readout Chip”, iar arhitectura sa este prezentată la nivel de schemă bloc în figura 4-1. Acest ASIC a fost special dezvoltat pentru partea de ”front-end” a modului de fotodectie cu MaPMT ce va echipa telescopul JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module) dedicat studierii razelor cosmice. Prototipul SPACIROC2 este considerat versiunea de bază pentru viitoarea generație de ASIC din familia MAROC ce dorește a fi mai rezistent la radiații.

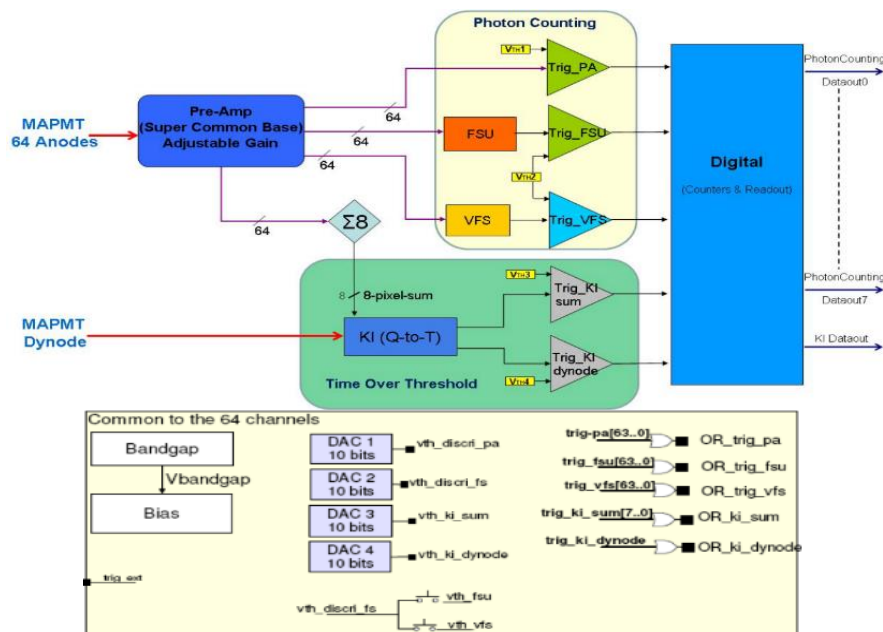


Figura 4-1 Arhitectura generală a cipului SPACIROC2.

Implementat în tehnologia BiCMOS de 0,35 μm SiGe la compania Austria Micro Sistem, cipul SPACIROC2 dispune de următoarele performanțe: un consum redus de putere 1 mW/canal; 100% eficiență de trigger pentru sarcină de intrare începând cu 50 fC (1/3 fotoelectron); conversie sarcină-timp cu ajutorul etajului (Q-to-T) implementat pe baza tehnici TOT (Time Over Threshold) în plaja 2 pC până la 400 pC; posibilitatea corecției dispersiei de fabricație pentru MaPMT cu 64 de canale cu ajutorul unui preamplificator care permite ajustarea fiecărui canal cu rezoluție de 8-bit.

4.1 Stand de test automatizat pentru iradiere

În mod similar, parametrii ce trebuiau monitorizați în timpul testelor au fost inițial discutați cu echipa de proiectanți ai cipului SPACIROC2. De această dată o listă mai amplă de parametri care să fie monitorizați și măsurați înainte, în timpul și după testele de iradiere este dată în tabelul 4-1. Trei plăci de teste echipate cu cipuri SPACIROC2 au fost foarte atent investigate în condiții normale de funcționare pentru obținerea parametrilor electrici considerați drept referință pentru cip. Testul de liniaritate pentru DAC2 va evidenția dacă acest etaj mixt

din ASIC este susceptibil la efecte cauzate de TID sau daune permanente induse de SEE, precum SEGR. Orice defecțiune a părți digitale coroborat cu unitatea "Photon Counting" va fi observată în modificarea curbelor de eficiență pentru trigger denumite Scurves și a celor de pedestal.

Tabelul 4-1 Lista parametrilor monitorizați pentru SPACIROC2

înainte /după iradiere	în timpul iradierii
• Puterea consumată de placa de test	▪ Puterea consumată de placa de test
• Puterea consumată de partea analogică a ASIC-ului	▪ Puterea consumată de partea analogică a ASIC-ului
• Puterea consumată de partea digitală a ASIC-ului	▪ Puterea consumată de partea digitală a ASIC-ului
• Teste liniaritate DAC2	▪ Referința internă de tensiune (Vbandgap)
• Referința internă de tensiune (Vbandgap)	▪ Componenta DC pentru etajul "Analog Probe (PA_BUFF)"
• Componenta DC pentru etajul "Analog Probe (PA_BUFF)"	▪ Componenta DC pentru etajul "Analog Probe (PA_BUFF)"
• Tensiune de ieșire DAC1 (vth_discri_pa)	• Tensiune de ieșire DAC1 (vth_discri_pa)
• Tensiune de ieșire DAC2 (vth_discri_fs)	• Tensiune de ieșire DAC2 (vth_discri_fs)
• Tensiune de ieșire DAC3 (vth_ki_sum)	• Tensiune de ieșire DAC3 (vth_ki_sum)
• Curbele de eficiența Scurves	• Temperatura
• Curbele de pedestal	
• Temperatura	

Am propus și contribuit la implementarea și automatizarea standului de test folosit pentru procedura de măsurare a rezistenței la radiații a ASIC-ului, fapt posibil cu sprijinul cercetătorilor de la OmegaMICRO. Schema de principiu a standului este prezentată în partea stângă a figurii 4-2. Spre deosebire de standul dedicat cipului MAROC3, de această dată s-a utilizat un sistem de achiziții de date (DAQ) dezvoltat de noi ce controlează și sursa de alimentare în comutație (SMPS) pentru placa de test a cipului SPACIROC2.

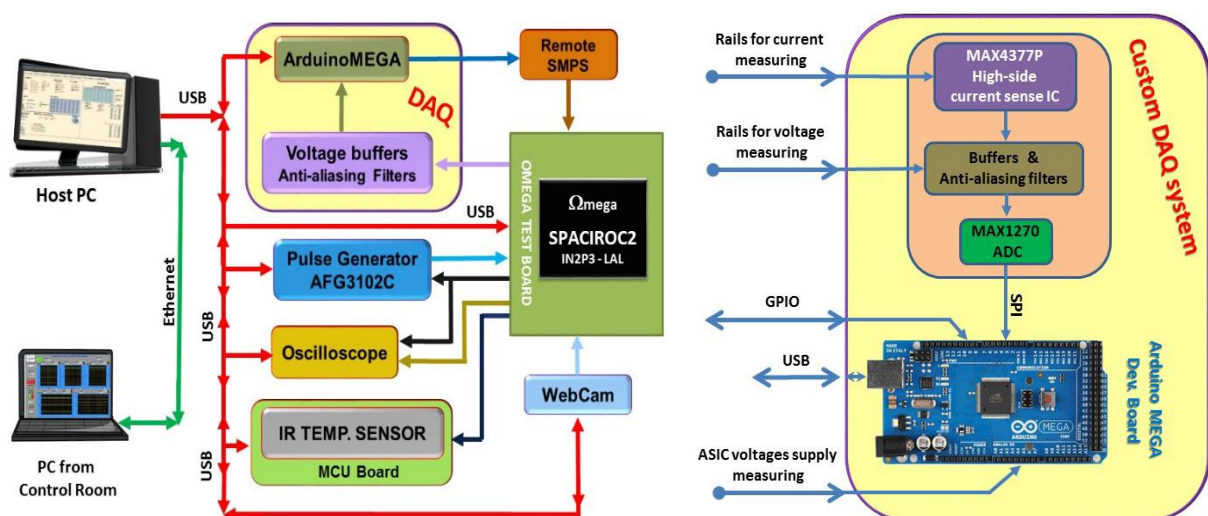


Figura 4-2 Schema standului automatizat de test pentru SPACIROC2 (partea stângă) și arhitectura sistemului DAQ (partea dreaptă).

Sistemul DAQ implementat dispune de următoarele performanțe: 24 intrări analogice din care 16 sunt cu rezoluție pe 10 biți și 8 cu rezoluție pe 12 biți; 54 de pini digitali GPIO; canale pentru măsurarea curenților; buffere analogice de tensiune și filtre anti-aliasing. Unitatea de procesare pentru sistemul DAQ este o placă comercială de dezvoltare ArduinoMega. Cele 8 intrări analogice pe 12 biți rezoluție aparțin unui ADC extern seria MAX1270 conectat la unitatea de procesare prin interfață SPI. Patru din intrările acestui ADC sunt dedicate măsurării de curent cu ajutorul circuitului integrat seria MAX4377. Blocul de condiționare semnal dispune de un buffer de tensiune implementat cu amplificator operațional ce are câștigul unitar stabil din seria MCP6424 urmat de o rețea RC pasivă cu filtre anti-aliasing. Toate tensiunile de intrare trec prin blocul de condiționare semnal și ajung apoi în ADC. Semnalul de la MaPMT este emulat de un generator de pulsuri sincronizat cu ajutorul semnalului generat de placa de test SPACIROC2. Cu excepția SMPS, celelalte componente ale standului de teste comunică datele preluate printr-o interfață USB către calculatorul aflat în interiorul camerei de iradiere. Aceste date sunt retransmise mai departe prin Ethernet calculatorului din camera de control.

4.2 Test de iradiere cu fascicul de 200 MeV protoni

Primul test în cadrul campaniei de iradiere a cipului SPACIROC2 a avut loc la Facilitatea de Iradiere cu Protoni (PIF) din cadrul Institutului Paul Scherrer (PSI), Elveția. În cazul acestui ASIC s-a utilizat un fascicul de protoni cu energia de 200 MeV și cu fluxul de $1,089 \cdot 10^9$ protoni/cm²s. Placa DUT a fost montată pe suport metalic de prindere în fața ferestrei de ieșire a fasciculului. În lateralul liniei de fascicul se pot observa echipamentele parte a standului de test, după cum este prezentat în figura 4-3. Alinierea cipului 19 mm² (4,6 x 4,1 mm) cu axa fascicolului s-a făcut cu ajutorul unui sistem de ghidare cu laser. Pentru fiecare DUT în parte s-a făcut o caracterizare completă, după instalarea fără ca fasciculul să fie pornit. Valorile măsurate pentru parametrii electrice au fost comparate cu cele din laborator și luate drept referință considerând temperatura din interiorul camerei iradiere cu variații între 30-36 °C.



Figura 4-3 Standul de test pentru SPACIROC2 instalat la PIF (partea stângă) și linia de fascicul din apropiere (partea dreaptă).

Trei cipuri SPACIROC2 au fost iradiate până la 100 krad TID (Si) fiecare. Toate cele trei eşantioane de ASIC nu au prezentat nici o variație semnificativă în timpul iradierii pentru următorii parametri: tensiunea intern de referință (V_{bandgap}), componenta DC a etajului Analog Probe (PA_BUFF), tensiunea de ieșire pentru DAC1, tensiunea de ieșire pentru DAC3, respectiv tensiunea de ieșire pentru DAC2. Iradierea a fost realizată în pași de 10 krad până la 100 krad cu scopul de a determina pragul unde cipul încetează să mai funcționeze corespunzător. Pentru ultima doză de 83,12 krad TID s-a observat o creștere a puterii consumate de blocul analogic. Două salturi de curent au fost înregistrate pentru blocul digital al cipului. Cele două evenimente de tip SEL a avut loc la un TID de 14,78 krad și 67,72 krad, iar funcționarea cipului a fost restabilită prin întreruperea alimentării, fapt evidențiat de figura 4-4. Curentul consumat de blocul digital a început să crească în trepte începând cu doza de 60,72 krad. Pe parcursul depunerii ultimei doze, s-a întrerupt tensiunea de alimentare de patru ori, după cum se observă în figura 4-5, dar curentul blocului digital nu a revenit la valoarea lui de referință. Numai după așa numitul proces de "annealing" la temperatura camerei efectele TID au dispărut, iar consumul de putere pe partea digitala al cipului a revenit la nivelul de referință.

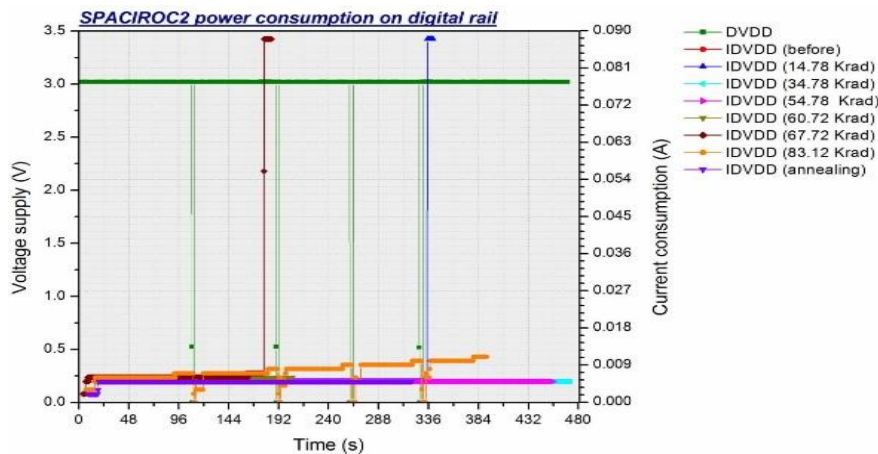


Figura 4-4 Consumul de curent pentru blocul digital al celui de-al treilea cip în timpul testului de iradiere.

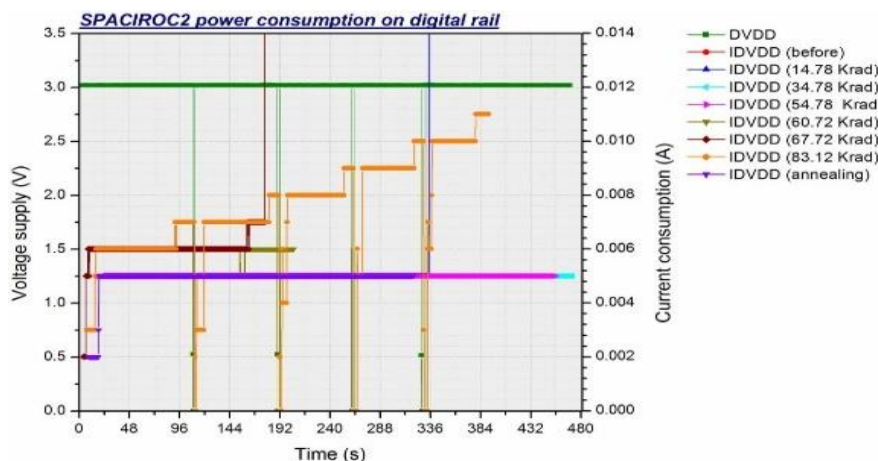


Figura 4-5 Zoom pe axa curentului digital al celui de-al treilea cip în timpul testului de iradiere.

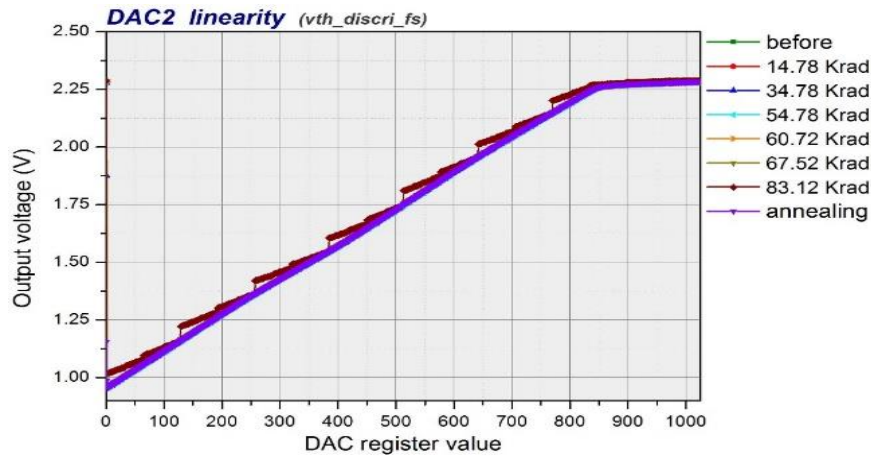


Figura 4-6 Testul de liniaritatea pentru DAC2 al celui de-al treilea cip după fiecare doză.

Nici o variație a tensiunii de ieșire pentru DAC2 nu a fost observată în timpul iradierii, totuși DAC2 și-a pierdut liniaritatea începând cu valoarea TID-ului de 67,72 și mai pronunțat pentru valoarea de 83,12 krad, comportament prezentat în figura 4-6. Liniaritatea pentru DAC2 a revenit în parametrii prin procesul de "annealing".

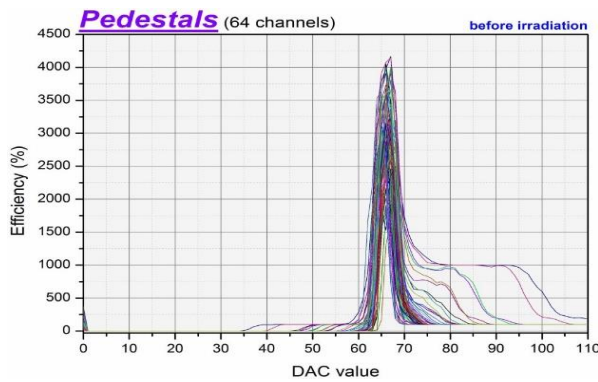


Figura 4-7 Curbele de piedestal al celui de-al treilea cip înainte de iradiere.

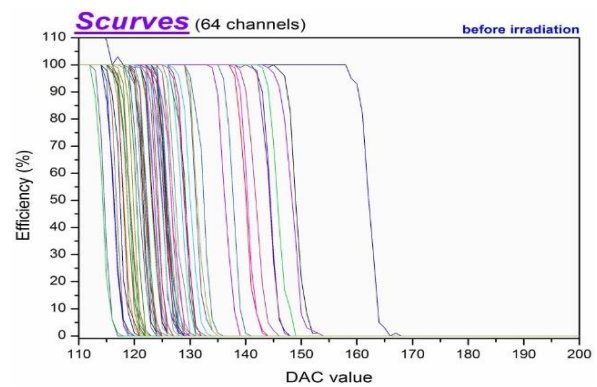


Figura 4-8 Curbele de eficiență (Scurves) al celui de-al treilea cip înainte de iradiere.

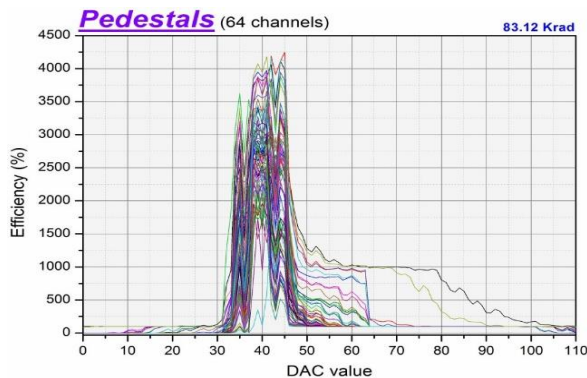


Figura 4-9 Curbele de piedestal al celui de-al treilea cip după 83,12 krad.

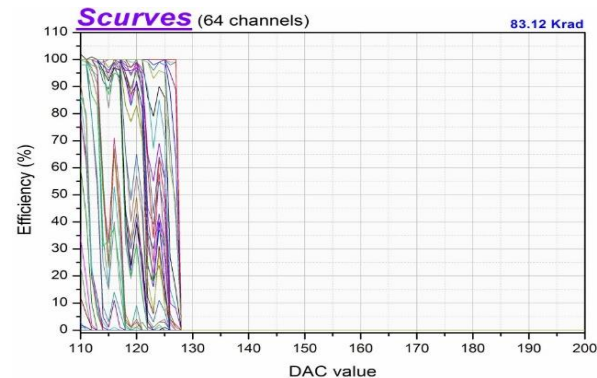


Figura 4-10 Curbele de eficiență (Scurves) al celui de-al treilea cip după 83,12 krad.

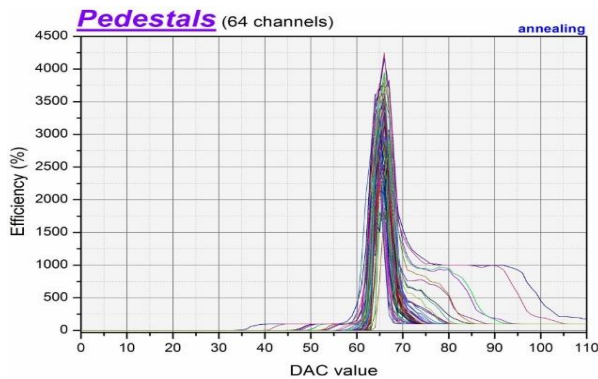


Figura 4-11 Curbele de pedestal al celui de-al treilea cip după procesul de "annealing".

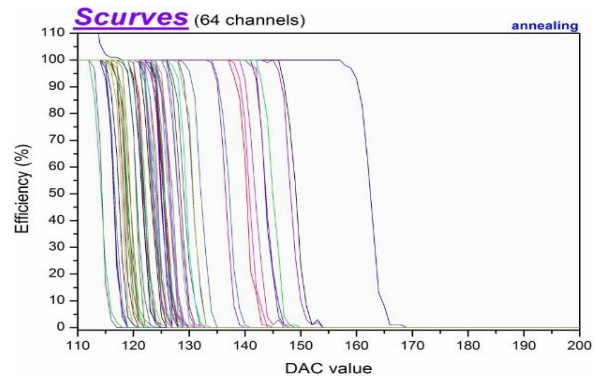


Figura 4-12 Curbele de eficiență (Scurves) al celui de-al treilea cip după procesul de "annealing".

Curbele de eficiență pentru trigger au fost determinate folosind o sarcină de intrare de 150 fC, echivalentul a 1 p-e. După depunerea ultimei doze de 83,12 krad TID, s-a observat că domeniul curbelor de pedestal s-a întrepătruns cu cel al Scurves, aspect prezentat în figura 4-9 și 4-10, comportament determinat de pierdere a linearității DAC2. După procesul de "annealing" curbele de eficiență din figura 4-12 prezintă variații neglijabile de alură și valori măsurate față de cele măsurate înainte de iradiere, a se vedea figura 4-8. Asemenea pentru curbele de pedestale din figurile 4-7 și 4-11.

Am realizat o analiză aprofundată pentru curbele de eficiență trigger pentru fiecare canal din DUT. În acest scop, un script Python a fost dezvoltat pentru a verifica dacă pe fiecare canal din cipurile iradiate curbele de eficiență trigger și-au schimbat poziția, forma sau s-au panta de la doză la doză. Ca observație generală, pentru fiecare dintre cele trei dispozitive testate s-au înregistrat schimbări semnificative pentru curbele de pedestal și Scurves după doza de 60 krad TID, deci o înrăutățire a eficienței de trigger. În toate canalele investigate, curbele de eficiență și-au schimbat forma și poziția după ce TID-ul acumulat a trecut peste limita menționată anterior.

4.3 Concluzii și contribuții

Suportul tehnic oferită de grupul ce a dezvoltat ASIC-ul SPACIROC2 ne-a permis, nu doar înțelegerea modul de operare a cipului, dar și realizarea unei strategii de monitorizare adecvată. Experiența acumulată, în urma iradierii cipului MAROC3 cu raze X, a fost utilă la îmbunătățirea standului de test pentru monitorizarea parametrilor electrici pentru SPACIROC2 în timpul testării la radiații și a acestui ASIC. Astfel, arhitectura concepută pentru acest stand îndeplinește cerințele de monitorizare pentru ambele versiuni de ASIC-uri, cât și pentru cele viitoare.

Grupul nostru a avut oportunitatea să realizeze o primă caracterizare în fascicul de protoni pentru SPACIROC2. Rezultatele obținute în timpul iradierii cu protoni la o energie de 200 MeV a fost ulterior discutat cu grupul OmegaMICRO, o atenție specială fiind acordată blocului digital al cipului. Echipamentele electronice ce vor echipa telescopul JEM-EUSO vor fi expuse la 0.1 krad TID pe an în spațiu. Sonda spațială va prelua date timp de 4-5 ani în mediul ostil al Orbitei Joase a Pământului (LEO), Luând în calcul că fasciculul de protoni a avut un flux de aproximativ $1,089 \times 10^9$ particule /cm²s, procesul de "annealing" este de așteptat să înlăture rata efectelor induse de radiații în mediul LEO. Prin urmare, cipul SPACIROC2 s-a dovedit a fi o soluție tehnică viabilă din clipa în care a rezistă până la 60 krad TID. Pe de altă parte, această versiune prototip de SPACIROC2 nu a îndeplinit cerințele privind toleranța la

radiații impuse de experimentele LHC unde dozele și fluxul de particule vor depăși nivelul de toleranță a cipului SPACIROC2.

Partea digitală a cipului SPACIROC2 s-a dovedit a fi predispusă unor defecțiuni cauzate de efectele radiațiilor ionizante. Acest bloc va fi investigat îndeaproape în viitoarele teste, un exemplu în acest sens îl reprezintă măsurarea liniarității celor 4 DAC-uri încorporate. De asemenea, saturarea curbelor de liniaritate pentru DAC-uri va fi eliminată prin modificarea rezistorului polarizare extern pentru aceste etaje. O altă cauză de îngrijorare o reprezintă fenomenul de tip SEL asociat unui stări înalte de curent pe alimentarea blocului digital, fapt observat la două din cele trei cipuri testate. Credem că aceste SEL-uri apar cel mai probabil datorită atomilor dislocați din rețeaua cristalină, deci ioni grei secundari (Si, Ge sau metallic), ce induc acest fenomen. O contribuție semnificativă la salturile de curent înregistrate poate surveni și datorită SEU/MBU ce pot afecta regiștrii de configurare din cip. Pentru următoarele teste de iradiere, s-a dezvoltat o procedură pentru a reciti informația salvată din regiștrii de configurare, operație ce poate evidenția dacă efecte de tip SEU/MBU au loc. Ambele presupuneri vor fi investigate în timpul iradierii cipurilor SPACIROC2 cu fascicul de ioni grei de diferite specii. Pentru această iradiere cu protoni s-a determinat secțiunea eficace pentru SEL de $0,78 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2$, cu 54% incertitudine. În mediul cosmic ion grei au valori ale LET-ului de la 0.01 până la 40 MeV cm²/mg. Cu această ocazie, va fi explorată vulnerabilitatea cipului la efecte catastrofale din categoria SEE.

5. FPGA pentru experimente de fizica energiilor înalte

Pentru noul sistem de fotodetecție al sub-detectorilor RICH se dorește ca plăcile digitale din celulele elementare (EC) să fie dezvoltate pe baza unei soluții comerciale de FPGA din tehnologia SRAM. Ca variantă de rezervă s-a luat în considerare și FPGA-urile din tehnologia "antifuse". Seria de 7 de FPGA-uri produse de Xilinx dispune de patru familii de dispozitive de ultimă oră implementate în tehnologia 28 nm HKMG. Familia KINTEX-7 FPGA a fost selectată ca soluție optimă pentru realizarea plăcilor digitale datorită următoarelor criterii: raportul preț-performanță și numărul de pini I/O necesari sistemului electronic din noua celulă elementară. Beneficiind de suport și expertiză din partea grupului de cercetători implicați în modernizarea sub-detectorilor RICH, am propus și realizat arhitectura standului de test prezentat în figura 5-1. Mai departe, procedura de test a fost dezvoltată în strânsă colaborare cu grupul LHCb de la Cambridge.

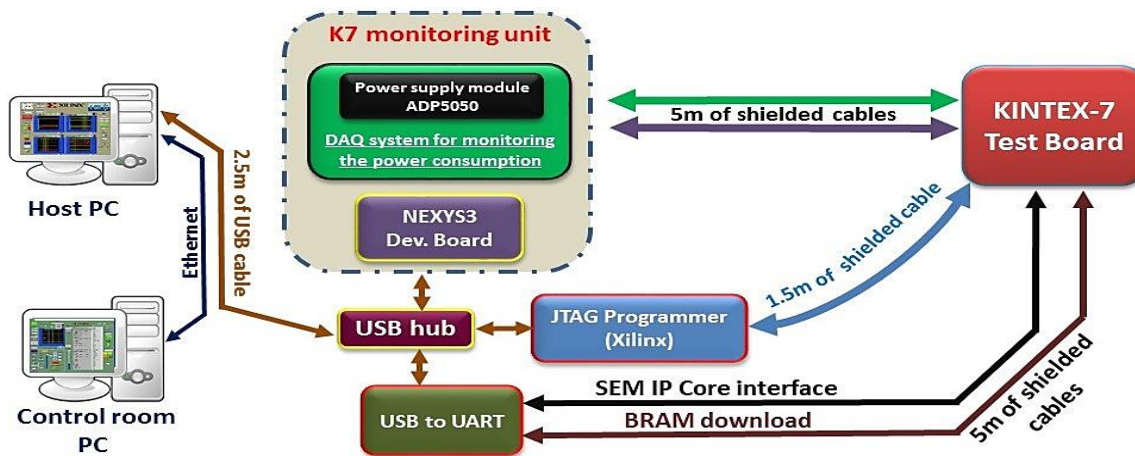


Figura 5-1 Standul de test al cipului KINTEX-7 pentru monitorizarea în timpul iradierii.

O întreagă arhitectură de test a fost realizată în jurul cipului KINTEX-7 ce a fost montat pe placa de teste alături de un număr minim de componente electronice adiționale. Acestea asigură minimul necesar pentru o funcționare de bază a FPGA-ului, în timp ce programarea acestuia este realizată prin intermediul programatorului XILINX JTAG conectat printr-un cablu la placa sa de test. Sursa de alimentare a DUT-ului are patru căi de alimentare monitorizate de sistemul DAQ. Mai mult, starea firmware-ului pentru DUT este în mod continuu verificată cu ajutorul unei plăci de dezvoltare NEXYS3 ce găzduiește un FPGA SPARTAN-6. Toate datele sunt transmise prin interfața USB de la placa NEXYS3, programatorul JTAG și sistemul DAQ către calculatorul situat în camera de iradiere.

Testarea rezistenței la radiații a unui dispozitiv atât de complexe, precum FPGA-ul KINTEX-7, se bazează exclusiv pe firmware dezvoltat special pentru evaluarea sa în timpul testelor. Grupul nostru a adoptat o soluție simplă în acest sens și s-a decis instanțierea doar acelor elemente logice din arhitectura FPGA-ului KINTEX-7 supuse spre testare în radiație. Figura 5-2 prezintă arhitectura generală a firmware-ului pentru FPGA-urile parte a standului de test la radiații. Memoria de configurare (CRAM) a FPGA-ului KINTEX-7 este cea mai mare dintre toate tipurile de memorie încorporate de acest dispozitiv. Dispozitivul are în total 18884576 biți de memorie CRAM ce permit configurarea elementelor logice existente în dispozitiv pentru aplicații dedicate. Chiar un singur schimbat bit din cauza efectelor induse de radiații în CRAM poate avea un efect sever, chiar catastrofal în funcționarea dispozitivului, iar în cazuri extreme poate cauza căderea întregului sistem. Apariția fenomenului SEU în CRAM

poate duce la conflict între elementele și blocurile logice din FPGA prin schimbarea funcției CLB sau a topologiei de conexiuni din cip.

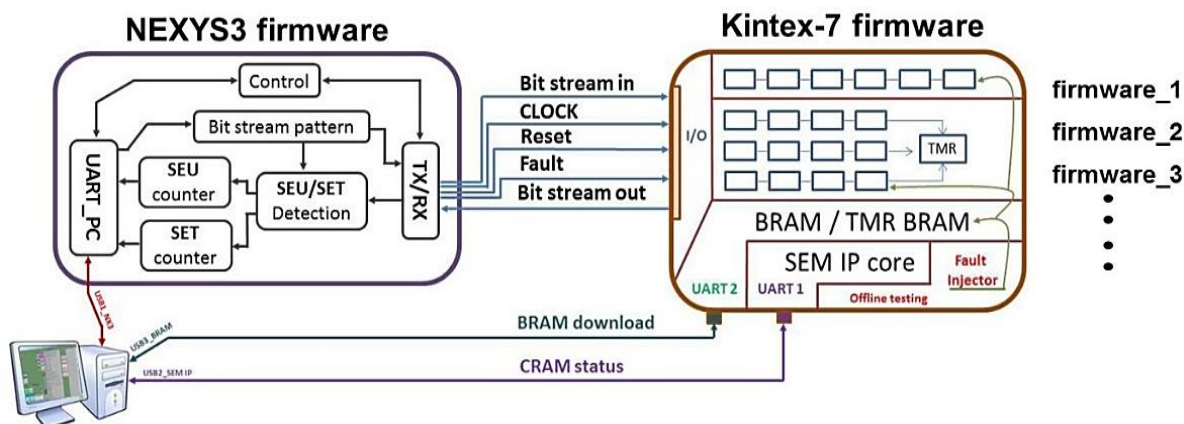


Figura 5-2 Arhitectura firmware-ului pentru NEXUS3 și pentru iradierea DUT-ului KINTEX-7, inclusiv SEM IP Core pentru ”CRAM scrubbing”.

Astfel, utilizarea unui firmware ce înglobează componenta SEM Core de la Xilinx a fost considerată ca și soluție de ”CRAM scrubbing” intern pentru FPGA-ul KINTEX-7. Acest SEM IP Core poate fi pus în stare inactivă, iar cu ajutorul unei interfețe UART sau SPI permite injectarea de erori la adrese de biți din CRAM. În acest mod utilizatori pot avea posibilitatea să simuleze un efecte SEU în firmware-ul dezvoltat și implementat pe FPGA pentru a putea vedea cum se comportă dispozitivul.

5.1 Iradierea cu ion grei a FPGA-ului KINTEX-7

Primele teste au avut loc la facilitatea SIRAD din cadrul laboratorului INFN Legnaro, Padova, Italia. Această facilitate de iradiere cu ion grei pune la dispoziție o gamă largă de specii de ioni ce au o valoare a LET-ului pornind de la 0,02 MeV cm²/mg și 4390 μm adâncime de pătrundere în Si până la LET de 81,7 MeV cm²/mg și 23,4 μm adâncime de pătrundere. Figura 5-3 prezintă camera de iradiere de la SIRAD cu linia de fascicul și vasul cu vid în poziție deschisă ce permite accesul la suportul pentru probele de iradiat. Fluxul de ioni al fasciculului poate fi modificat între 10⁵ și 5x10⁸ ioni/cm²/s.

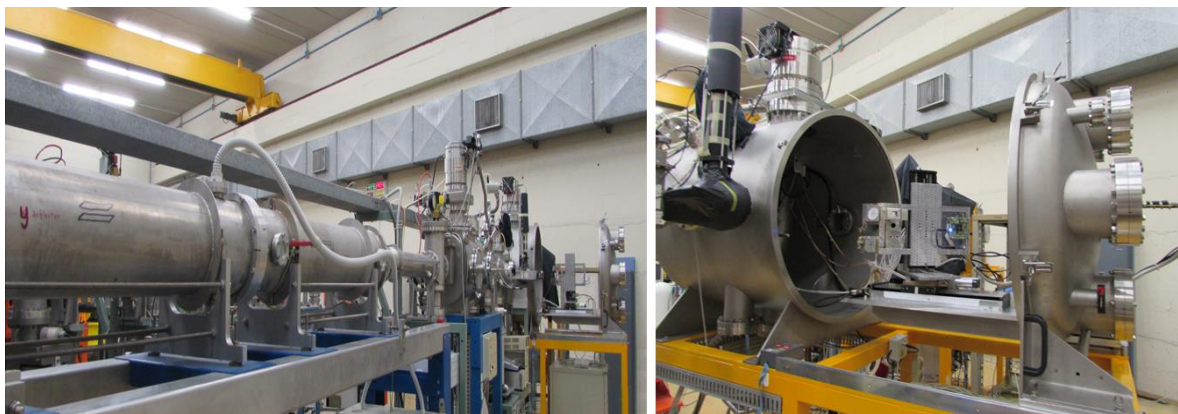


Figura 5-3 Linia de fascicul a acceleratorului Legnaro Tandem- XTU și placa de test KINTEX-7 instalată în interiorul vasului pentru iradiere.

Cel de-al doilea test de iradiere a fost posibil prin programul AIDA2020 EU, iradierea s-a realizat la Resurse Cyclotron Resource Center în Louvain-la-Neuve, Universitatea Catolică din Louvain, Belgia (UCL). Facilitatea pentru Iradiere cu Ion Grei (HIF) pune la dispoziție o gamă variată de specii de ioni ce au LET-ul în plaja 0,4 la 56 MeV/(mg/cm²) pentru cocktail-ul de ioni cu un grad ridicat de penetrare în Si. În ceea ce privește fasciculul, are un diametru maxim de 25 mm și o omogenitate ±10%, în timp ce fluxul poate fi modificat de la câțiva ioni/cm²s până la aproximativ 10⁵ ioni/cm²s. Figura 5-4 prezintă vasul de iradiere, alături de placa de test KINTEX-7 montată pe suportul metallic și o fereastră în corpul metalic al vasului.

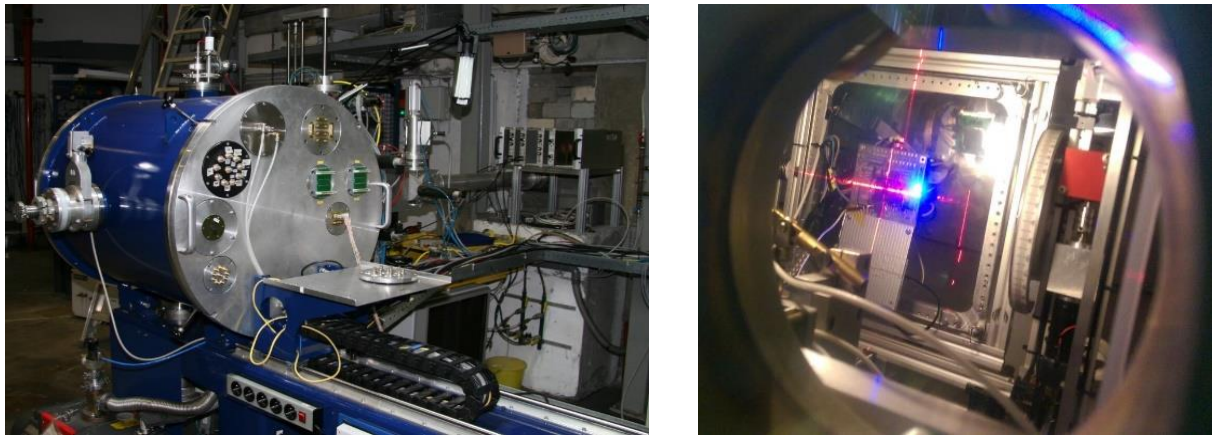


Figura 5-4 Vasul pentru iradiere din HIF în poziția închis și vedere din interior vasului în timpul alinierii cu laser a DUT.

Scopul primului test de iradiere realizat la SIRAD a fost să determinăm cât de dăunătoare sunt efectul radiațiilor induse în FPGA atunci când memoria CRAM nu are nici o soluție de eliminare a erorilor prin procedura de ”scrubbing”. Au fost folosite două specii de ioni grei în timpul iradierii, Oxigen ¹⁸O la 108 MeV cu un LET de 3,197 MeV cm²/mg (estimat TRIM) și Flor ¹⁹F la 122 MeV cu un LET de 3,67 MeV cm²/mg (LNL estimat pentru suprafață) sau 3,899 MeV cm²/mg (estimat cu TRIM pentru volumul semiconductor al dispozitivului). Firmware-ul a fost implementat să ocupe doar 40% din resursele logice ale FPGA-ului.

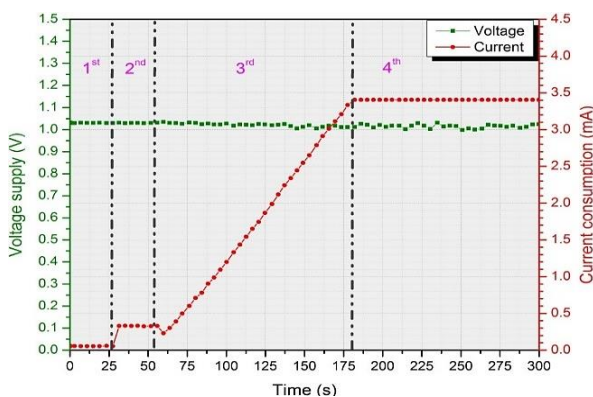


Figura 5-5 Consum ridicat de curent pe FPGA core și BRAM în timpul iradierii cu ioni de ¹⁹F, datorat acumulării de SEU în CRAM.

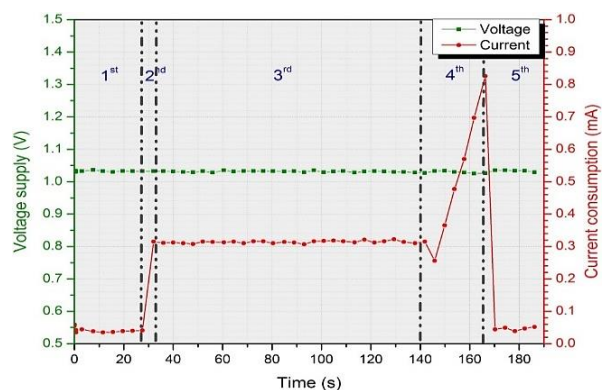


Figura 5-6 DUT în stare nedeterminată aspect evidențiat de curentul pe FPGA core la iradierea cu ioni de ¹⁹F, apariție SEFI.

Spre exemplu, unul din testele efectuate sub fascicul de ion de ¹⁹F a arătat că creșterea graduală de curent este cauzată de acumularea de SEU în CRAM. Astfel, elementele logice

inactive intervin în arhitectura firmware-ului și afectează funcționarea FPGA-ului ca urmare a coruperii memoriei CRAM de efectul SEU, vezi figura 5-5. De asemenea, comportamentul tipic al fenomenului SEFI a fost observat în DUT, vezi figura 5-6, iar curentul consumat de linia de alimentare a FPGA core și BRAM s-a dublat în mai puțin de 15 secunde, apoi a urmat o scădere rapidă la nivelul de consum aferent dispozitivului neprogramat. De această dată rata de ocupare a firmware-ului a fost aproape de 100%.

În timpul testelor de iradiere cu ion grei a fost înregistrat un salt de curent ce poartă semnătura evenimentului de tip micro-SEL, iar variația de curent a fost măsurată pe linia de alimentare de 1,8 V, comportament similar menționat și în alte surse din literatură. Fluența cumulată pe DUT a fost de $7,56 \cdot 10^5$ ioni/cm². Figura 5-7 prezintă creșterea în trepte de aproximativ 100 mA a curentului, aceste creșteri nu au putut fi eliminate prin operația de "CRAM scrubbing" sau rescriere a întregii configurații, ci doar prin cicluri de oprire a alimentării pentru dispozitiv. Disiparea de putere pe FPGA a dus la creșterea temperaturii pe cip până la valoarea de 70 °C, vezi figura 5-8.

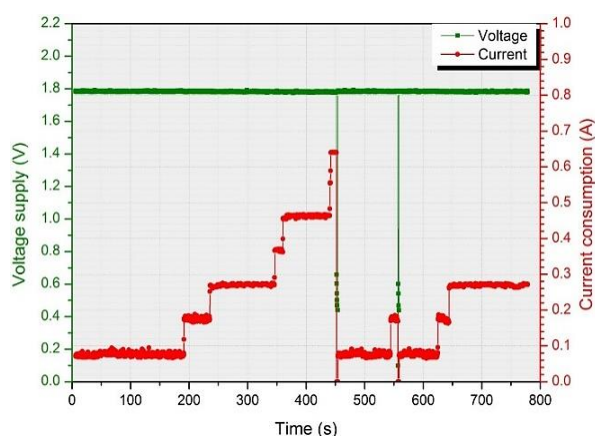


Figura 5-7 SEL indus de ionii grei cu LET de 15.56 MeV cm²/mg în linia de alimentare de 1.8 V.

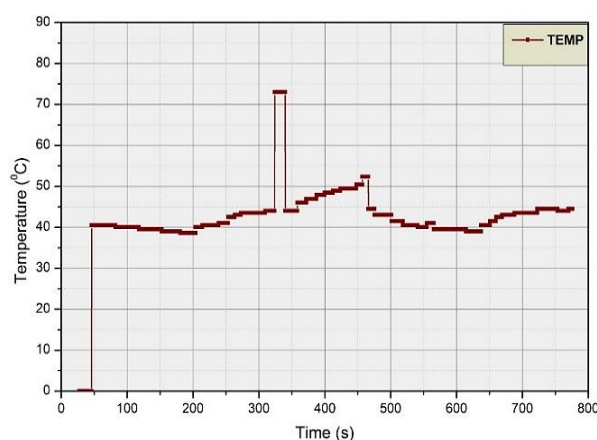


Figura 5-8 Temperatura pe cip în timpul iradierii cu ioni de ⁴⁰Ar¹²⁺.

Am continuat să investigăm predispoziția dispozitivului KINTEX-7 la fenomene de tip SEL folosind diferite specii de ion cu LET din ce în ce mai ridicat. Prin urmare, următorul test a fost realizat folosind ioni de ⁵⁸Ni¹⁸⁺ la 582 MeV și LET de 20,4 MeV cm²/mg. Testul final a fost făcut cu ioni de ⁸⁴Kr²⁵⁺ la 769 MeV și LET de 32,4 MeV cm²/mg. Fluxul fasciculului a fost de 10³ ioni/cm²/s, iar fluența totală de 9,11x10⁵ ioni/cm². De această dată, s-au înregistrat și confirmat prin cicluri de oprire a alimentării fenomenul SEL și în linia de alimentare de 1,5 V, respectiv 3,3V cu excepția liniei de alimentare pentru FPGA core și BRAM.

5.2 Teste de iradiere cu 200 MeV protoni

Un test eliminatoriu este cel de TID-ul cu un pragul fixat la 200 krad, doză estimată în cazul sub-detectorilor RICH. În acest scop, s-a accesat facilitatea PIF de iradiere cu protoni de la PSI, unde am testat de asemenea și cipul SPACIROC2. Iradierea s-a realizat cu un fascicul de protoni la 200 MeV și flux ajustabil în intervalul 10⁷ până la 10⁹ particule/cm²/s. Trei FPGA-uri au fost iradiate subsecvent, fiecare până la 500 krad echivalentul TID în Si cu fluență acumulată per dispozitiv de aproximativ 10¹⁰ și 10¹² protoni/cm². Chiar dacă, doza a depășit de două ori și jumătate pe cea nominală de 200 krad estimată pentru cel mai rău scenariu în fazele de modernizare a LHCb-RICH. Nici un eveniment SEL nu a fost observat, iar prin

reprogramarea dispozitivului s-au eliminat efectele cauzate de SEU. Mai mult de atât, nici un efect permanent nu a fost observat la dispozitivele testate, nici o creștere în curent sau fluctuație de tensiune. Din nou a fost înregistrată o rată ridicată SEU în CRAM la teste cu protoni, însă la rate mai mici decât în cazul iradierii cu ioni grei, acest fapt fiind așteptat. Testele post-iradiere nu au evidențiat nici un efect cumulativ indus de radiații ce are putea compromite dispozitivul KINTEX-7.

5.3 Concluzii și contribuții

Studiile pentru măsurarea rezistenței la radiații, a versiunii celei mai ieftine de FPGA din familia KINTEX7, s-au realizat din perspectiva și constrângerile dictate de mediul mix de radiație preconizat în interiorul detectorului LHCb. Un stand de test automatizat a fost proiectat și implementat pentru a înregistra parametri electrici și software a DUT-ului în timpul testelor de evaluare. Pentru a ne asigura că comportamentul celorlalte dispozitive netolerante la radiații nu influențează măsurătorile, placa de test pentru KINTEX-7 a fost proiectată să fie cât mai simplă. În plus, placa de test respectă principalele cerințe pentru placa digitală din EC, precum lipsa unei memorii externe flash pentru stocarea firmware-ului necesar FPGA-ului. Datele colectate în timpul iradierii au fost salvate în fișiere ASCII pentru a fi analizate ulterior. Puterea consumată de FPGA pe cele 4 căi principale de alimentare este măsurată la un interval de 50 ms, în timp ce raportul oferit de SEM IP Core este stocat continuu. Pentru protejarea echipamentelor electronice necesare monitorizării FPGA-ului configurația standului de test a fost dusă la limită. Ca și exemplu, pentru iradierea cu protoni unitatea de monitorizare a fost plasată la 5 m distanță de DUT, în timp ce datele culese sunt transmise prin alt cablu USB de 5 m lungime la calculatorul din camera de iradiere, iar prin Ethernet ajung la calculatorul din camera de control.

Testele cu ion grei efectuate au dezvăluit câteva aspecte cruciale privind toleranța împotriva efectelor de tip SEE a FPGA-ului KINTEX-7. Alte teste și timp suplimentar de fascicul va fi necesar pentru a finaliza un studiu riguros privind acest DUT vizând măsurătorile de toleranță la radiații a altor elemente logice încorporate în FPGA, precum BRAM, SLR32 și bancurile I/O. Până acum am confirmat ceea ce alte surse din literatura de specialitate au prezentat referitor la fenomenul de micro-SEL imediat peste valoarea de LET impusă de Colaborarea LHCb și anume $15 \text{ MeV cm}^2/\text{mg}$, dat fiind că dispozitivul nostru KINTEX-7 nu face parte din categoria "space-grade". Investigarea memoriei CRAM cu ion grei fără metodă de corecție a erorilor ne-a permis să observăm câteva efecte ce pot putea avea loc atunci când un singur bit este modificat în configurație, respectiv influențele efectului acumulării de SEU ce duce la creșterea consumului de putere. O bună soluție în acest sens s-a dovedit a fi componenta SEM IP Core înglobată în firmware-le de test pentru a realiza o introspecție rapidă și eficientă în memoria de configurare a FPGA-ului și a efectelor în momentul coruperii informației stocate în ea. Cu ajutorul SEM IP Core-ului am avut posibilitatea să observăm modul în care se comportă FPGA-ul atunci când un CRAM este corupt în mod deliberat prin injecție de erorii în anumite locații ale memoriei. Din păcate, eficiența acestei soluții interne de înlăturare a erorilor din CRAM pentru FPGA-ul a scăzut repede către 0% când fasciculul are un flux foarte ridicat sau particulele au un LET ridicat. Astfel, s-a luat în considerare utilizarea SEM IP Core-ului în conjuncție cu o memorie flash externă, fapt care ne-ar permite să avem o eficiență mai bună în restabilirea biților afectați în CRAM.

Testele de iradiere cu protoni au fost o surpriză plăcută din clipa în care KINTEX-7 a rezistat la 500 krad TID fără a avea probleme notabile datorită efectelor cumulative, deși nivelul SEU era foarte ridicat. Din cele menționate în literatura de specialitate nici un alt FPGA din familia KINTEX-7 nu a fost iradiat la un nivel așa ridicat de TID. Totuși, nivelul neașteptat de

SEU provocat de protoni în CRAM rămâne una din principalele preocupări fiind folosit un fascicul de protoni cu fluxul între 10^7 și 10^9 particule/cm²/s. Nici un fel de efect cumulativ nu a fost observat în timpul testelor efectuate post-iradiere.

Prin studierea toleranței la radiații a FPGA-ului KINTEX-7, vom înțelege mai bine cum se comportă acest dispozitiv și ce ar putea compromite folosirea lui în arhitectura plăcilor digitale pentru sistemul de fotodectecție al sub-detectorilor RICH. Dacă se va constata că aceste FPGA-uri sunt fiabile să funcționeze cu un grad de încredere în câmpul mixt de radiație din LHCb, atunci 3000 de FPGA-uri vor fi achiziționate pentru reconstruirea sub-detectorilor în LS2 din cadrul LHC – ”Upgrade Phase”.

Concluzii și contribuții personale

Grupul LHCb-Romania oferă în continuare suport pentru modernizarea detectorului LHCb, lucru realizat printr-o implicare activă în cadrul programului de Cercetare și Dezvoltare (R&D) destinat detectorului, în special în campaniile de testare a rezistenței la radiații dedicate noilor dispozitive semiconductoare. Aceste dispozitive sunt luate în calcul pentru sub-detectorii RICH, mai exact în sistemul de fotodetecție. În calitate de membru al grupului, implicarea mea a constat, în contextul studiilor de rezistență la radiații, în: iradierea și analiza datelor pentru ASIC-ul MAROC3 și testarea unui FPGA din familia KINTEX7 în condiții LHC. Rezultatul final al acestor teste a fost să extrapolăm, pe baza datelor culese, dacă aceste dispozitive semiconductoare pot avea o funcționare fiabilă pentru o anumită perioadă de timp în condițiile nominale al câmpului mixt de radiații, fluctuații de temperatură și câmp magnetic din interiorul detectorului LHCb pentru faza "Upgrade" (luminozitate 50 fb^{-1}).

Dezvoltat special pentru telescopul JEM-EUSO, SPACIROC2 este al doilea ASIC studiat de grupul nostru, astfel rezistența la TID a fost măsurată pentru condițiile din spațiul în care operează ESA-ISS. Această versiune prototip de ASIC servește, de asemenea, ca arhitectură de bază pentru următoarea generație de MAROC. Testarea rezistenței la radiație a acestor trei dispozitive depinde, în principal, de datele colectate în timpul testelor de iradiere. Pentru fiecare din acestea a fost stabilită o listă de parametrii electrici pentru a fi monitorizați în timpul testelor. Folosind standurile de test special realizate și prezentate în capitolele anterioare, acești parametrii sunt înregistrați continuu, apoi se efectuează o comparație cu valorile de referință, respectiv cu parametrii post-iradiere. În acest context, în rândurile ce urmează voi prezenta contribuțiile experimentale, practice și teoretice aduse la evaluarea toleranței la radiație a acestor trei cipuri.

I. Contribuții experimentale

Am definit și conceput strategii și metode de test pentru evaluarea circuitelor integrate MAROC3, SPACIROC2 și KINTEX7 folosind diferite surse radiație. Acest lucru a fost posibil, în principal, datorită colaborării noastre cu echipa de proiectanți din LAL-OmegaMICRO și a altor partenerii din cadrul LHCb. Având în vedere că plăcile de test oferite de Omega MICRO pentru MAROC3 și SPACIROC2 nu au fost concepute să fie folosite în medii cu radiații, măsurii speciale au fost luate pentru a permite expunerea numai a DUT de pe plăcii de test la fascicul. O mască de plumb a fost proiectată pentru a proteja dispozitivele adiționale aflate pe placă lângă DUT. PCB-ul proiectat pentru testarea FPGA-ului KINTEX-7 a fost conceput exclusiv pentru expunerea la radiații, astfel nu au fost necesare materiale adiționale de protecție. Contribuțiile aduse la proiectarea standurilor de test pentru iradierii și implementarea lor, alături de procedura de testare sunt prezentate pe scurt în următoarele rânduri.

După studierea amănunțită a arhitecturii cipului MAROC3 și plăcii sale de test, alături de teste desfășurate în condiții normale de funcționare fără radiații, am propus arhitectura unui stand de test pentru evaluarea sub radiații a cipului. În acord cu echipa de proiectanți a ASIC-ului, am întocmit o listă de parametrii electrici spre a fi monitorizați. De asemenea, am început proiectarea și implementarea standului de test necesar pentru MAROC3 având în vedere următoarele etape:

- Mai întâi am conceput o arhitectură de stand automatizat prevăzută în jurul sistemului DAQ comercial NI USB6009 ce a permis monitorizarea diversilor parametrii electrici de pe placa MAROC3. Cu acest sistem DAQ am putut comanda și alte elemente ale standului de test, precum sursa de alimentare pentru IC.

CONCLUZII

- Am implementat o sursă de alimentare pentru placa MAROC3 capabilă să livreze 1,6 A pe linia de alimentare de +6,5V și -7,3V. Mai mult de atât, prin intermediul sistemului DAQ această sursă de alimentare poate fi comandată să întrerupă tensiunile de ieșire, astfel se poate realiza un ciclu pornire/oprire a alimentării ASIC-ului atunci când este nevoie.
- Am contribuit la realizarea circuitului de măsurare a curentului consumat de MAROC3 necesare identificării posibilelor evenimente de tip SEU-uri care s-ar putea dovedi la fel de distructive ca SEL.
- Pentru monitorizarea disipării căldurii de pe cipul MAROC3 în timpul iradierii, am ales două tipuri de senzori folosiți apoi în strategia de monitorizare a temperaturii. Pentru partea din spate a PCB-ului aflat sub ASIC am folosit traductorul de temperatură PT100, în timp ce pentru suprafața cipului MAROC3 am folosit un senzor de temperatură infraroșu fără contact din seria MLX90614, apoi am ecranat întreg circuit într-o carcasă de plumb groasă de 5 mm împotriva dispersării fasciculului sau a particulelor împrăștiate de suprafața cipului. Am asamblat partea de hardware a senzorului MXL90614, inclusiv modulul de procesare pe bază de microcontroler seria ATEMGA326.
- Am echipat standul de test cu toate cablurile ecranate necesare pentru interconectarea echipamentelor din componență. Concomitent ocupându-mă cu studierea și caracterizarea comportamentului MAROC3 în condiții normale de funcționare.
- Interfața LabVIEW folosită pentru controlul standului de test a fost dezvoltată parțial de mine. Prin intermediul acesteia fiind posibilă înregistrarea parametrilor monitorizați și salvarea acestora în fișiere ASCII, valorile măsurate înainte de iradiere pentru fiecare ASIC au fost considerate drept referință.
- Cu privire la iradierea cipului MAROC3 cu raze X, am participat la instalarea aranjamentului experimental pe linia de fascicul și la procesul de monitorizare.
- Am participat la analiza datelor și am interpretat toți parametri electrici înregistrați în timpul testelor de iradiere, cât și cei măsurati post-iradiere.

Datorită asemănării la nivel de arhitectură între ASIC-ul SPACIROC2 și MAROC3 s-a decis proiectarea unui nou stand de test care să poată îndeplini cerințele necesare monitorizării celor două ASIC-uri. De această dată, sistemul DAQ pentru stand a fost realizat în totalitate de noi fiind evitate, astfel, toate neajunsurile sistemului DAQ comercial utilizat. Contribuția mea experimentală pentru investigarea toleranței la radiații a cipului SPACIROC2 este prezentată în rândurile de mai jos:

- Fișierul GERBER necesar pentru fabricarea PCB-urilor, alături de schema plăcii de test pentru SPACIROC2 au fost oferite de grupul din OmegaMICRO. Una din sarcinile mele a fost trimiterea PCB-ului la fabrică pentru implementare, apoi m-am ocupat de asamblarea completă în laborator a trei plăci de teste pentru SPACIROC2. Etapă urmată de testarea și verificarea funcționalității lor.
- Dat fiind faptul că ASIC-urile erau montate pe plăcile de teste prin intermediul unor socluri cu clemă, a trebuit să adaptez soclurile astfel încât să permită prinderea capsulei ceramice a cipului SPACIROC2. Mai mult de atât, folosind un microscop electronic am aliniat fiecare pini al cipului cu cel al soclului.
- Standul de test a fost implementat sub supervizarea mea, iar eu am participat la asamblarea unității de monitorizare. Alături de aceste sarcini, s-a aflat echiparea întregului stand de test cu cablurile ecranate aferente.
- De asemenea, mi-am adus contribuția la dezvoltarea GUI și a sistemului DAQ, etapă urmată de caracterizarea fiecărui cip SPACIROC2 înainte de procedura de iradiere.
- În cadrul testelor cu fascicul de protoni, desfășurat la PSI în Elveția, am contribuit la instalarea aranjamentului experimental pe linia de fascicul, precum și la procedura de monitorizare.

- La analiza datelor rezultate din măsurătorile efectuate, am contribuit la interpretarea modificărilor apărute în parametri electrici pe parcursul iradierii.

KINTEX7 FPGA reprezintă principalul dispozitiv electronic ce se dorește a fi utilizat pe plăcile digitale a sistemului de fotodetecție din sub-detectorii RICH. Testarea rezistenței la radiații a acestui dispozitiv implică, nu doar accesul la diferite facilități de iradiere, dar și resursele materiale și umane ridicate datorită complexității hardware, dar și software/firmware. Contribuția noastră s-a materializat prin proiectarea și implementarea întregului stand de test și a plăcilor pentru FPGA-ul KINTEX7 în concordanță cu indicațiile oferite de experții ce fac parte din colaborarea LHCb. Placa de test destinată pentru KINTEX-7 a fost concepută să funcționeze cu minimul de componente electronice externe necesare FPGA-ul pentru o funcționare minimală. Etapele parcurse pentru proiectarea și implementarea standului, respectiv pentru testarea toleranței la radiații a dispozitivului KINTEX7 au fost următoarele:

- Propunerea arhitecturii plăcii de test pentru FPGA, placa de alimentare a FPGA-ului și sistemului DAQ. Fiecare topologie de circuit a fost discutat în întâlnirile din cadrul colaborării LHCb, apoi aprobate pentru implementare.
- A trebuit să supervizez proiectarea schemei electrice și PCB-ului pentru plăcile KINTEX7.
- După ce PCB-urile au ajuns de la fabrică, am asamblat 9 plăci cu FPGA din care 4 aveau cipurile FPGA subțiate. Pentru acestea am folosit o stație de IR reballing. În mod similar am procedat și pentru placa de alimentare asociată FPGA-ului testat.
- Unitate pentru monitorizarea FPGA-ului a fost implementată cu ajutorul meu, în timp ce cablurile ecranate necesare interconectării echipamentelor din stand au fost instalate de mine.
- După asamblarea standului de test KINTEX-7, m-am implicat în testarea dispozitivului și coordonarea dezvoltării firmware-ului. Alături de acestea, am sugerat câteva îmbunătățiri pentru implementarea GUI. Per ansamblu, a trebuit să rezolv problemele hardware întâmpinate în timpul testării versiunii finale de stand.
- Am oferit expertiză în utilizarea SEM IP Cor-ului și am luat parte la testele desfășurate în laborator.
- În ceea ce privește testele de iradiere realizate la SIRAD Legnaro, HIF Louvain și PSI, alături de colegii mei, a trebuit să instalez aranjamentul experimental pe liniile de fascicul ale facilităților, apoi am participat la monitorizarea dispozitivului în timpul procedurii de iradiere.
- M-am implicat în analiza datelor culese în urma iradierii FPGA-ului KINTEX-7. Comportamentul dispozitivului a trebuit explicat prin coroborare parametrilor electrici cu cei software/firmware înregistrați în timpul testelor de iradiere.

Aceste teste de măsurare a toleranței la radiație rămân singura soluție viabilă pentru a verifica dacă un circuit integrat poate fi folosit într-un anumit mediu radioactiv. În ciuda costurilor, timpului și muncii depuse, testele de iradiere furnizează datele cruciale pe baza cărora comportamentul dispozitivului într-un mediu cu radiații poate fi înțeles. Până acum, datele strânse în urma diverselor iradiere au menținut interesul utilizării în mediul de radiații LHC a FPGA-ului KINTEX-7. Datorită ratei mari de SEU măsurate în memoria de configurație a dispozitivului testat, a fost luat în considerare un alt dispozitiv FPGA din tehnologia antifuse. KINTEX-7 este o soluție promițătoare pentru arhitectura digitală, în special după ce a trecut cu succes testul TID. Nici un efect dăunător SEE nu a avut loc în timpul testelor cu ion grei. Totuși, rate ridicate SEU în CRAM rămâne o problemă.

II. Contribuții teoretice

Am realizat raportări periodice privind evaluarea dispozitivelor electronice MAROC3, SPACIROC2 și KINTEX7 către colaboratori LHCb și celor din LAL-OmegaMICRO de la

Ecole Polytechnique, Palaiseau Paris, Franța. Fapt care mi-a permis să beneficiaz de expertiza lor în domeniul testelor de rezistență la radiație a microelectronicii folosite în experimentele de fizica energiilor înalte. Deseori, pentru problemele întâmpinate s-au găsit soluții în cadrul acestor ședințe. O listă cu prezentările efectuate este dată mai jos.

1. ***Data analysis for the SPACIROC2 proton irradiation***, LHCb-Romania, September 21st 2016, IFIN-HH, Magurele, Romania, available at: <https://indico.cern.ch/event/570828/>
 - Cu această ocazie am discutat împreună cu grupul ce a dezvoltat ASIC-ul SPACIROC2 despre rezultatele preliminare ale iradierii cipului cu 200 MeV protoni. Comportamentul ASIC-ului la o doză de peste 60 krad a fost interpretat îndeaproape.
2. ***Preliminary results of KINTEX-7 irradiation with heavy ions at Louvain***, RICH Upgrade Meeting, June 14th 2016, CERN, Geneva, Switzerland, available at: <https://indico.cern.ch/event/540695/>
 - Am prezentat rezultatele preliminare în urma iradierii cu ioni grei la Louvain a FPGA-ului KINTEX-7 unde am determinat pragul de apariție a evenimentului micro-SEL.
3. ***KINTEX-7 FPGA radiation hardness studies, test bench, firmware, error mitigation & scrubbing***, LHCb Upgrade Electronics, February 11th 2016, CERN, Geneva, Switzerland, available at: <https://indico.cern.ch/event/490512/>
 - În această prezentare am punctat pregătirile realizate pentru testarea la radiație a FPGA-ului KINTEX-7, concentrându-mă asupra firmware-ului dezvoltat, alături de metoda de corecție a erorilor cu SEM IP Core.
4. ***Update on SPACIROC2 testing***, Omega MICRO designer team, November 19th 2015, Drahi-X Novation Center, Ecole Polytechnique, Paris, France.
 - Am prezentat grupului de la LAL-OmegaMICRO standul de test și strategia de monitorizare pentru iradierea cu protoni a ASIC-ului SPACIROC2.
5. ***Status and perspectives for KINTEX-7 irradiation***, Mini-meeting on irradiations for RICH Upgrade, July 8th 2015, CERN, Geneva, Switzerland available at: <https://indico.cern.ch/event/406534/>
 - Planul de iradiere, alături de statusul standului de test pentru KINTEX-7 au fost prezentate în detaliu.
6. ***Update on KINTEX-7 irradiation setup***, RICH meeting, June 8th 2015, CERN, Geneva, Switzerland available at: <https://indico.cern.ch/event/399125/>
 - Am prezentat noile caracteristici și îmbunătățirile aduse arhitecturii standului de test pentru KINTEX-7.
7. ***First prototype of KINTEX7 module designed for irradiation tests***, RICH Upgrade Testbeam Meeting, April 1st 2015, CERN, Geneva, Switzerland available at: <https://indico.cern.ch/event/385716/>
 - Cu această ocazie am introdus în discuție versiunea funcțională de bază a standului de test pentru evaluarea la radiații a dispozitivului KINTEX-7.
8. ***Irradiation of MAROC3 with X-Ray and the KINTEX7 PCB design***, Mini-meeting on Irradiations for RICH Upgrade, February 20th 2015 CERN, Geneva, Switzerland, available at: <https://indico.cern.ch/event/374595/>

- Au fost prezentate rezultate de la testarea a două cipuri MAROC3 cu raze X alături de arhitectura preliminară a statului de test pentru KINTEX-7.
9. **Characterization of the MAROC 3 before irradiation**, RICH Upgrade Testbeam Meeting, July 23th 2014, CERN, Geneva, Switzerland, available at: <https://indico.cern.ch/event/331717/>
- În această prezentare, am propus arhitectura standului de test pentru monitorizarea ASIC-ului MAROC3 în timpul procesului de iradiere, împreună cu o listă de parametri selectați pentru monitorizare, respectiv strategia de iradiere.
10. **Multi Anode ReadOut Chip (pre-irradiation tests)**, RICH Upgrade Testbeam Meeting, June 11th 2014, CERN, Geneva, Switzerland, available at: <https://indico.cern.ch/event/324199/>
- Am făcut cunoscute câteva probleme în grupul de lucru care au întârziat caracterizarea MAROC3 în condiții normale de funcționare.

III. Diseminarea rezultatelor

Contribuțiile aduse de prezenta teză, în domeniul măsurării toleranței la radiație a dispozitivelor semiconductoare, au fost diseminate prin intermediul participărilor la conferințe și publicării de articole. În cele ce urmează sunt enumerate toate contribuțiile științifice realizate:

A. Lucrări relevante pentru tema tezei:

- [1] V. M. Placinta, **L. N. Cojocariu**, and C. Ravariu, "Test bench design for radiation tolerance of two ASIC's," *Accepted for publication in Romanian Journal of Physics (RJP)*, 2017, ISI journal with impact factor 1.398;
- În acest articol a fost publicată arhitectura standului de test pentru măsurarea rezistenței la radiație a ASIC-ului SPACIROC2 și MAROC3. S-au descris efectele cumulative și singulare induse de radiație alături de metodele utilizate pentru măsurarea lor.
- [2] M. K. Baszczyk, M. Benettoni, **L. Cojocariu** et al, "Test of the photon detection system for the LHCb RICH Upgrade in a charged particle beam," *Journal of Instrumentation*, vol. 12, pp. P01012-P01012, 2017, DOI: 10.1088/1748-0221/12/01/p01012, ISI journal with impact factor 1.310;
- În această lucrare s-au prezentat testele efectuate în fascicol de protoni a versiunii prototip de celulă elementară populată cu MaPMT din seria Hamamatsu R11265 conectați la placa "front-end" implementată cu ASIC-ul CLARO.
- [3] **L. N. Cojocariu**, V. M. Placinta, and L. Dumitru, "Monitoring System for Testing the Radiation Hardness of a KINTEX-7 FPGA," *9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (Bpu-9)*, vol. 1722, p. 140009, 2016, DOI: 10.1063/1.4944199, (ISI Proceeding);
- Arhitectura standului de test pentru măsurarea toleranței la radiație a FPGA-ului KINTEX-7 a fost publicată alături de prima arhitectură de firmware pentru iradiere folosită la testele efectuate la SIRAD, Legnaro. De asemenea, impactul SEL și SEU în elementele logice din FPGA a fost simulat.

- [4] M. Prelipceanu, **L. Cojocariu**, A. Graur, and S. Schrader, "Analysis of thermally stimulated processes in new phenanthroline derivatives suitable for optoelectronic devices," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 585, p. 012011, 2015 DOI: 10.1088/1742-6596/585/1/012011, (ISI Proceeding);
- Acest studiu prezintă un compus adecvat pentru dispozitivele optoelectronice ce pot avea aplicabilitate de asemenea și în experimentele fizicii energiilor înalte.
- [5] R. Aaij, B. Adeva, **L. Cojocariu** et al, LHCb Collaboration, "Search for long-lived heavy charged particles using a ring imaging Cherenkov technique at LHCb," *European Physical Journal C*, vol. 75, Dec 2015, DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3809-7, ISI journal with impact factor 4.912;
- Aici s-a publicat o analiză în detaliu a performanțelor sub-detectorilor RICH în deosebirea mionilor de particule grele sau încete. Studiul a fost efectuat pentru ciocniri de protoni-protoni la energii de 7 TeV și 8 TeV.
- [6] R. Aaij, B. Adeva, **L. Cojocariu** et al, LHCb Collaboration, "LHCb detector performance," *International Journal of Modern Physics A*, vol. 30, Mar 10 2015, DOI: 10.1142/s0217751x15300227, ISI journal with impact factor 2.373.
- Pe baza datelor culese în perioada 2010 - 2012, prezentul studiu își dorește să evalueze performanțele detectorului LHCb printr-o analiză amănunțită a fiecărui sub-detector, inclusiv RICH. Rezultatele scot în evidență rolul detectorului LHCb în investigarea blocurilor constructive ale materiei și antimateriei.

B. Participări la conferințe:

1. **L.N. Cojocariu**, F. Maciuc, V.M. Placinta, "Experimental study on Soft Error Mitigation Core (SEM IP) efficiency", Workshop on Sensors and High Energy Physics (SHEP 2016), Stefan Cel Mare University of Suceava (USV), Suceava, Romania, 21 – 22 October 2016.
2. V.M. Placinta, **L.N. Cojocariu**, "Test bench for ASIC radiation hardness evaluation", Workshop on Sensors and High Energy Physics (SHEP 2016), Stefan Cel Mare University of Suceava (USV), Suceava, Romania, 21 – 22 October 2016.
3. **L.N. Cojocariu**, V.M. Placinta, "Designing and implementing test benches for radiation hardness qualifications of readout electronics from LHCb RICH photodectors", The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP), July 2-4 2015, Ovidius University of Constanta, Romania, IBWAP Book of abstracts, pp. 103-104.
4. V.M. Placinta, **L.N. Cojocariu**, "Practical test bench used for testing Photomultiplier Tubes, type MaPMT", The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP), July 2-4, 2015, Ovidius University of Constanta, Romania, IBWAP Book of abstracts, pp. 115.

C. Alte lucrări în domeniul electronicii aplicate:

1. **L.N. Cojocariu**, F. Maciuc, V.M. Placinta, "Experimental study on Soft Error Mitigation Core (SEM IP) efficiency", Workshop on Sensors and High Energy Physics (SHEP 2016), Stefan Cel Mare University of Suceava (USV), Suceava, Romania, 21 – 22 October 2016.

2. V.M. Placinta, **L.N. Cojocariu**, "*Test bench for ASIC radiation hardness evaluation*", Workshop on Sensors and High Energy Physics (SHEP 2016), Stefan Cel Mare University of Suceava (USV), Suceava, Romania, 21 – 22 October 2016.
3. **L.N. Cojocariu**, V.M. Placinta, "*Designing and implementing test benches for radiation hardness qualifications of readout electronics from LHCb RICH photodectors*", The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP), July 2-4 2015, Ovidius University of Constanta, Romania, IBWAP Book of abstracts, pp. 103-104.
4. V.M. Placinta, **L.N. Cojocariu**, "*Practical test bench used for testing Photomultiplier Tubes, type MaPMT*", The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP), July 2-4, 2015, Ovidius University of Constanta, Romania, IBWAP Book of abstracts, pp. 115.

D) Lucrări în calitate de membru al listei de autori în colaborarea LHCb:

Peste 100 de articole și studii publicate în jurnale cu factor de impact ridicat.