



FACULTATEA DE ȘTIINȚE APLICATE



Politehnica University of Bucharest
Faculty of Applied Sciences
Department of Physics

Horia Hulubei National Institute for R&D in Physics and Nuclear Engineering
(IFIN-HH)

Silicon PhotoMultiplier based detection structures for nuclear spectroscopy

Doctoral Thesis

Cătălin Neacșu

PhD Coordinator

Prof. dr. Gheorghe Căta-Danil

Scientific Coordinator

Dr. ing. George Pascovici

Bucharest, 2022

Contents

1. Radiation Detectors. Detection mechanism	4
1.1. Introduction	4
1.2. Ionization detectors	5
Gas ionization detectors	5
Semiconductor detectors. The <i>pn</i> junction.	7
1.3. Scintillation detectors	12
1.3.1. The scintillator	14
Scintillation mechanisms	15
Unwanted phenomena in scintillators	21
Scintillator parameters	22
1.3.2. The Light Sensor	25
Photo Multiplier Tube	25
Photo Diode	26
Avalanche Photo-Diode	27
Silicon Photo Multiplier	28
2. The Front-End Structure of a Detector	33
2.1. Introduction	33
2.2. The voltage mode amplifier	33
2.3. The current mode amplifier	34
2.4. Capacitive source amplifiers	34
2.5. The charge sensitive amplifier	35
2.6. The transimpedance amplifier	35
2.7. The inverting configuration	36
2.8. The non-inverting configuration	37
2.9. The adder	37
2.10. The low-pass filter	37
2.11. The high-pass filter	39
2.12. The Sallen-Key topology	40
2.13. The signal driven multiplexer	41
2.14. The voltage and current feedback amplifiers	42
2.15. The JFET amplifier	42

2.16. Pulse Shaping and P/Z compensation	43
2.17. The noise contribution	46
2.18. The ISOLDE beta detector	47
3. Analytical Analysis of a Signal Driven Multiplexed SiPM Array	49
3.1. Introduction	49
3.2. Signal Driven Multiplexer - System analysis	50
3.2.1. The Signal Driven Multiplexing topology	50
3.2.2. Schottky diode SPICE model	50
3.2.3. System Model	52
3.2.4. The calculation of the transfer and response functions	53
H(s), y(t), y'(t) - the ideal case of L=0	56
H(s), y(t), y'(t) - the real case	57
3.2.5. The Python script	57
3.3. Parameter sweep - Simulation Results and discussion	59
3.3.1. Schottky diode capacitance	60
3.3.2. Schottky diode dynamic resistance	61
3.3.3. Parasitic inductance of the diode	63
3.3.4. Parasitic resistance of the Schottky diode	64
3.3.5. Parasitic inductance of PCB traces	65
3.3.6. Input Capacitance of Operational Amplifier	68
3.3.7. Input Impedance of Operational Amplifier	70
3.3.8. The number of SiPM cells	70
3.3.9. SiPM output equivalent resistance	72
3.3.10. SiPM output capacitance	74
3.3.11. Schottky diode bias resistor	75
3.4. Conclusion	76
4. Parameters and measurements specific to radiation detectors systems	79
4.1. Introduction	79
4.2. Statistics - distributions	80
4.2.1. The binomial distribution	80
4.2.2. The Poisson distribution	81
4.2.3. The normal (Gaussian) distribution	82
4.3. Noise in electronic systems	82
4.4. The terminology of pulse signals in nuclear electronics	86
4.5. Detector properties.	89
4.5.1. Modes of operation	89
Pulse mode	89
Current mode	90
4.5.2. Response Function	90

4.5.3.	Sensitivity	91
4.5.4.	Detector response	91
4.5.5.	Energy resolution. Fano factor. FWHM	91
4.5.6.	Pulse height spectra	93
4.5.7.	Detector efficiency	94
4.5.8.	Response Time	95
4.5.9.	Dead Time	96
4.6.	Measurement setup for energy spectra acquisition	97
4.7.	Time measurement methods and setup	98
4.7.1.	Leading edge	99
4.7.2.	Zero crossing	100
4.7.3.	Constant Fraction Triggering (CFT)	100
4.7.4.	Amplitude and Rise-time Compensation (ARC)	101
4.7.5.	LaBr ₃ (Ce) + SiPM Array time characterization setup (CFD-ARC)	102
5.	Data analysis	104
5.1.	Introduction	104
5.2.	Laboratory measurements	104
5.2.1.	Scintillator optical path contribution to rise time	104
5.2.2.	Pulse rise time	106
5.2.3.	Baseline noise measurements	108
5.2.4.	Energy resolution and energy calibration	110
5.2.5.	Time resolution	111
5.3.	In beam measurements	112
5.3.1.	Calibration spectra	113
5.3.2.	In beam spectra	113
6.	Conclusions and outlook	116
	Appendices	123
A.	Mathematical framework	123
A.1.	Frequency response of the system	123
A.2.	Convolution product	124
A.3.	Fourier image of a function	125
A.4.	Laplace transform	126
A.5.	The Laplace image of common electronic signals	127
A.6.	The inversion formula of the Laplace image	127
A.6.1.	Unique real roots	128
A.6.2.	Unique real and complex roots	128
A.6.3.	Multiple real and complex roots	129

B. Source Codes	130
B.1. Python Code Sources	130
B.2. BAT15-04W - SPICE model Code	141
C. Detector Schematic	143
Bibliography	147

Cuvinte cheie: Foto-multiplicator cu siliciu, beta, gama, scintilator, detector de radiatie, spectroscopie, timp, energie

Introducere

Fotomultiplicatorul cu siliciu (SiPM) este alternativa cu corp solid pentru inlocuirea senzorului de lumina clasic, tubul fotomultiplicator (PMT), folosit pentru colectarea fotonilor de scintilatie din detectoarele de radiatie. SiPM-urile sunt caracterizate de tensiune mica de alimentare, robustete mecanica, imunitate ridicata la campurile magnetice si dimensiuni reduse. Toate acestea deschid calea catre dezvoltarea de detectoare avand orice forma si dimensiune.

Pentru ca un detector cu senzor de lumina bazat pe SiPM sa poata fi considerat ca alternativa la unul cu PMT, acesta trebuie sa aiba performante de timp si energie cel putin la fel de bune. Scopul acestei lucrari este acela de a studia si dezvolta detectoare care indeplinesc aceasta conditie cat si de a dezvolta detectoare dedicate pentru aplicatiile in care PMT-ul nu poate fi folosit din diverse motive. Munca realizata pe perioada studiilor doctorale a fost posibila ca urmare a colaborarii cu Institutul de Fizica si Inginerie Nucleara - Horia Hulubei si accesul in laboratoarele Departamentului de Fizica Nucleara.

Lucrarea este structurata pe 5 capitole si acopera intreaga arie a detectiei si masurarii radiatiei ionizante, de la mecanismele de detectie pana la analiza datelor.

Cap. 1 trateaza structura tipica a detectoarelor de radiatie, tipurile acestora cat si mecanismele de detectie, punand accent pe detectoarele cu scintilator, mecanismele specifice scintilatiei si senzorii de lumina folositi.

Cap. 2 studiaza structura primelor etaje electronice, topologiile amplificatoarelor de semnal, structurile de filtrare necesare pentru imbunatatirea raportului semnal/zgomot, multiplexarea comandata de semnal folosita pentru citirea matricilor de SiPM si importanta zgomotului in sistemele electronice.

Cap. 3 este o analiza detaliata a multiplexorului comandat de semnal, realizata cu scopul de a intelege influenta parametrilor principali din proiectare in performanta de timp a detectoarelor. Abordarea este una analitica, bazata pe calculul raspunsului unui sistem cu ajutorul calculului operational, prin intermediul functiei de transfer $H(s)$.

Cap. 4 acopera cele mai importante aspecte ale masurarilor specifice detectoarelor de radiatie cum ar fi parametrii impusurilor, zgomotul, modurile de operare ale detectoarelor, sensibilitatea, timpul de raspuns, timpul mort, rezolutia de timp si energie sau aranjamentele experimentale pentru masurarea acestora.

Cap. 5 prezinta rezultatele obtinute in timpul lucrarii de doctorat si care au fost publicate in articole stiintifice. Articolele au ca subiect impactul drumului optic in scintilator asupra timpului de crestere al impusurilor electrice, performanta detectoarelor cu $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, caracterizarea si instalarea detectoarelor la IFIN-HH si ISOLDE-CERN.

In final, este prezentata lista contributiilor personale urmata de un apendice care contine o scurta prezentare a aparatului matematic folosit in Cap. 3, codurile sursa ale software-ului dezvoltat si codul sursa SPICE al diodei Schottky BAT15-04W, din care au fost extrasi diversi parametri necesari analizei multiplexorului comandat de semnal.

Detectori de radiatie. Mecanisme de detectie

Radiatia ionizanta, pe scurt radiatia este detectata ca urmare a interactiunii acesteia cu materia si astfel arhitectura unui detector este strans legata de radiatia pe care acesta trebuie sa o detecteze prin mecanismele de interactiune. Pe langa aceasta, structura unui detector mai depinde de factori precum dimensiune, forma, pret, greutate, tipul de aplicatie, rata minima de numarare, rezolutia de timp si energie, cost etc. In functie de mecanismul de detectie, se disting doua tipuri de detectoare: i) cu ionizare si ii) cu scintilator.

Detectoarele cu ionizare colecteaza direct sarcina electrica produsa la trecerea radiatiei prin materialul sensibil al detectorului. Daca materialul sensibil este un gaz, atunci sarcina este reprezentata de electroni si ioni care sunt colectati prin aplicarea unei diferente de potential. Valoarea diferentei de potential determina modul de functionare a detectorului: camera de ionizare, detector proportional sau contor Geiger Muller. In cazul in care materialul sensibil este un semiconductor, sarcina este reprezentata de electroni si goluri, care de asemenea sunt colectate prin aplicarea unei tensiuni de polarizare. Materialele uzuale sunt Si si Ge, functionand intr-o configuratie de jonctiune pn polarizata invers, caracterizata de curenti reziduali mici.

Detectoarele cu scintilator se bazeaza pe proprietatea unor materiale de a emite lumina la trecerea radiatiei. Semnalul luminos colectata si transformat in semnal electric cu ajutorul senzorilor optici.

In mod uzual, un detector cu scintilator are trei componente: i) scintilatorul, care in mod ideal emite un numar de fotoni proportional cu energia radiatiei incidente; ii) senzorul de lumina care furnizeaza un semnal electric cand cand primeste un semnal optic si iii) etajele electronice specifice senzorului optic, in principal un preamplificator, plasat in proximitatea acestuia, care amplifica semnalul electric. Acesta este necesar in cazul transmiterii semnalelor pe distante lungi, asigurand astfel un raport semnal/zgomot bun.

Scintolatoarele pot fi organice sau anorganice si se pot gasi intr-una din starile solida, lichida sau gazoasa. Sunt caracterizate de proprietati precum numarul de fotoni produsi, liniaritate, transparenta, timp de stingere, index de refractie, lungime de unda a fotonilor emisi, calitatea materialului optic in general.

Mecanismul scintilatiei depinde de material. In *scintilatoarele organice* emisia de fotoni isi are originea la nivel molecular, fiind reprezentata de transitia electronilor intre nivelele energetice ale structurii moleculare in orbitalii π in timp ce scintilatia din *cristalele anorganice* isi are originea in structura de benzi energetice din solid. Deseori in topitura cristalului se adauga activatori, precum Ce in $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$.

Cei mai importanti **parametri ai scintilatoarelor** sunt: numarul de fotoni emisi, lungimea de unda a maximului de emisie, constanta de dezexcitare, indexul de refractie, densitatea, punctul de inmuire, lungimea de atenuare si raportul H:C. Scintilatoarele prezinta si fenomene nedorit care le afecteaza performanta, precum pierderea fotonilor, absorbtia proprie, reflexii interne, toate acestea avand impact asupra performantelor de timp si energie ale detectorului.

Senzorul de lumina este un dispozitiv electronic capabil sa transforme pulsul de lumina provenit de la scintilator intr-un puls electric. Dispozitivele folosite uzual in electronica nucleara sunt tubul fotomultiplicator, fotodioda (PIN), fotodioda avalansa si mai nou, fotomultiplicatorul cu siliciu.

Tubul fotomultiplicator (PMT) este cel mai folosit senzor de lumina pentru detectoarele cu scintilatie, avand performante excelente atat in masuratorile de timp cat si in cele de energie. Indiferent de solutia constructiva, un PMT are o un fotocatod si un set de dinode, care realizeaza conversia fotonilor in electroni prin efect fotoelectric, respectiv multiplicarea electronilor prin fenomenul de emisie secundara.

Fotodioda, cunoscuta si ca dioda PIN, este cea mai simpla solutie bazata pe corp solid de senzor de lumina in locul PMT-ului. Fotonii din scintilatie ($3 - 4 \text{ eV}$) pot produce cu usurinta perechi electron-gol in semiconductor ($E_g = 1 - 2 \text{ eV}$). Colectarea sarcinii se realizeaza direct in interiorul cristalului, fiind caracterizata de eficienta cuantica ridicata. Numarul perechilor electron-gol este limitat la numarul fotonilor incidenti, intrucat nu exista un fenomen de multiplicare interna a acestora.

Fotodioda avalansa (APD), opereaza in regim de polarizare inversa la tensiuni ridicate, si se bazeaza pe o multiplicare in avalansa a sarcinii initiale. Aceasta avalansa este insa insotita de zgomot, care trebuie luat in considerare in aplicatiile cu APD. Amplificarea in aceste dispozitive depinde de tensiunea de polarizare dar si de temperatura.

Fotomultiplicatorul cu siliciu (SiPM) exploateaza fenomenul de strapungere din semiconductori si este realizat ca o matrice cu un numar ridicat de APD-uri, numite

microcelule, fiecare din acestea functionand in regim Geiger. Sunt disponibile comercial in dimensiuni variind de la 1x1mm pana la 10x10mm. In timp ce o microcelula poate doar semnala prezenta sau absenta fotonilor, sumarea semnalelor provenite de la matricea de microcelule produce un semnal analogic si contine informatii despre numarul de fotoni incidenti.

LaBr₃(Ce) este selectat ca material pentru scintilator datorita performantelor sale ridicate atat in masuratorile de timp cat si in cele de energie. SiPM-ul din **seria J** produs de OnSemi, este ales in baza evaluarilor anterioare realizate de echipa de la IFIN-HH, avand performante bune pentru aplicatiile de timp si energie.

Structura "Front-End Electronics" (FEE) a unui detector, reprezinta electronica nucleara care preia semnalele de la detector si le transfera etajelor urmatoare pentru a fi procesate sau afisate, in functie de nevoi. De regula contine un preamplificator dar poate contine si elemente aditionale precum filtrare, sumare, formatarea pulsurilor sau etaje de compensare. Structura FEE depinde de tipul de detector, arhitectura acestuia si semnalele de iesire dorite.

In cazul senzorilor rezistivi, amplificatoarele pot opera in doua moduri. **In modul tensiune** senzorul se comporta ca o sursa de tensiune, i.e.este caracterizat de o rezistenta interna de valoare mica. In acest caz amplificatorul trebuie sa aiba o rezistenta de intrare mare. In cazul senzorilor cu rezistenta interna mare, care pot fi asimilati surselor de curent, amplificatorul functioneaza in **modul curent** si este nevoie ca el sa aiba o rezistenta de intrare mica. In ambele configuratii, tensiunea de la intrarea amplificatorului poate fi calculata cu usurinta aplicand teoremele de circuit ale lui Kirchhoff.

Unele detectoare (senzorul) de radiatie pot avea o comportare capacitiva. In acest caz, tensiunea prezenta la bornele de iesire ale acestuia depind de sarcina produsa de radiatie si de capacitatea detectorului prin relatia $V_o = Q/C$. Condensatorul se va descarca prin rezistenta de intrare a amplificatorului cu o constanta de timp $\tau = RC$. In acest caz amplificatorul opereaza in mod tensiune.

Amplificatorul de tensiune care opereaza cu sursa capacitiva prezinta o problema in practica deoarece tensiunea de iesire depinde de capacitatea detectorului iar aceasta nu poate fi controlata precis in timpul procesului de fabricatie. O configuratie de amplificator a carui iesire nu depinde de capacitatea detectorului este **amplificatorul sensibil la sarcina**. In aceasta configuratie tensiunea de iesire depinde doar de sarcina din detector si de o componenta externa si anume condensatorul din retea de reactie a amplificatorului de sarcina.

Amplificatorul transimpedanta furnizeaza o tensiune la iesire cand la intrare este furnizat un curent (de cele mai multe ori continuu sau lent variabil in timp). Aceasta

configuratie este folosita pentru masurarea curentilor de valori mici si adesea necesita valori foarte mari ale rezistentei de reactie, $R_f > 100M\Omega$.

In ce priveste implementarea FEE, aceasta se poate realiza fie cu componente discrete fie cu circuite integrate, cel mai frecvent amplificatoare operationale, care pot opera fie in configuratia de **inversor fie repetoar**. Setarea amplificarii A se realizeaza de obicei cu ajutorul a doua rezistente, numite rezistenta de reactie si rezistenta de amplificare. Configuratia inversoare are impedanta de intrare egala cu rezistenta de amplificare, impedanta de iesire aproape zero si semnalul de iesire este inversat in raport cu cel de intrare. Configuratia repetoare are impedanta de intrare egala aproape infinita (este egala cu impedanta de intrare a amplificatorului operational), impedanta de iesire aproape zero iar semnalul de iesire este la fel ca cel de intrare (nu este inversat). Un parametru important al amplificatoarelor operationale este banda de frecventa, care este strans legata de amplificare.

Circuitul de sumare este util in situatiile in care semnalele de la doi sau mai multi senzori trebuie adunate intr-un singur semnal de iesire. Poate opera doar in configuratia inversoare.

O alta functie utile in FEE este cea de **filtrare**, care poate fi de tip trece jos, trece sus, trece banda sau opreste banda. In electronica nucleara, scopul filtrelor este de a imbunatati raportul semnal/zgomot, operatia fiind numita formatarea pulsurilor (eng. pulse shaping). O arhitectura comuna pentru filtre este topologia Sallen-Key, fiind foarte bine documentata in literatura tehnica si care ofera un control foarte bun asupra benzii de frecventa a semnalului dar si a raspunsului sistemului in general. Filtrarea, formatarea si scurtarea pulsurilor mai sus mentionate necesita si o retea de **formatare si compensare pol/zero**.

Sunt situatii in care circuitul de sumare nu este practic, fie din considerente de adaptare de impedanta, viteza sau contributie a zgomotului. In aceste situatii se recomanda folosirea unui multiplexor, care poate selecta si transmite la iesire doar semnalele de interes, masand restul semnalelor de intrare. Pentru matrice mari de SiPM se foloseste structura de **multiplexare comandata de semnal**, care se bazeaza pe folosirea unei diode Schottky duble pentru fiecare canal si care este in esenta un circuit analogic. Acest multiplexor pastreaza performantele de timp individuale ale SiPM in timp ce permite folosirea electronicii nucleare FEE de dimensiuni reduce.

Informatia de interes in electronica nucleara o reprezinta timpul, energia si pozitia spatiala. Energia este de obicei transmisa prin intermediul *pulsurilor lente*, unde precizia in masurarea amplitudinii este mai importanta decat viteza. In aceste circuite zgomotul si precizia joaca un rol important. Pe de alta parte, timpul este transmis prin *pulsuri*

rapide iar amplitudinea lor nu mai este atat de importanta, raportul panta/zgomot fiind parametrul critic.

Aceste doua circuite sunt suficient de diferite incat necesita electronica dedicata si astfel tipul constructiv al amplificatoarelor operationale folosite pentru fiecare din ele este diferit. Operationalele folosite pentru semnale lente sunt **amplificatoare cu reactie negativa in tensiune** in timp ce pentru semnalele rapide se folosesc **amplificatoare cu reactie negativa in curent**, fiecare avand performante dar si limitari specifice.

In anumite situatii, pentru reducerea suplimentara a zgomotului, un etaj **amplificator cu J-FET** (eng. junction field effect transistor) este folosit in primul etaj al lantului de amplificare. Amplificatoarele operationale cu structuri de intrare de tip FET nu sunt recomandate deoarece, fiind dispozitive cu doua intrari, au o contributie la zgomot suplimentara datorita terminalului nefolosit. Pentru reducerea suplimentara a zgomotului termic, FET-ul poate fi racit.

Literatura de specialitate abunda in informatii cu privire la sursele si **contributia zgomotului** in circuitele electronice. Teoria zgomotului se dovedeste a fi extrem de utila in proiectarea circuitelor in care raportul semnal zgomot este critic. Teoria trateaza subiecte precum adaptarea zgomotului sursei, filtrare, surse de curent si tensiune ale zgomotului si metode de calcul ale contributiei fiecarei surse de zgomot la performanta intregului sistem.

Analiza analitica a matricii SiPM in configuratia Multiplexorului comandat de semnal

In fizica nucleara momentul exact in care o particula intra in volumul sensibil al detectorului este foarte important. Exista cateva metode specifice prin care se marcheaza acest moment de timp: metoda pragului pe frontului crescator (Leading Edge Triggering), metoda trecerii prin zero (Crossover timing), metoda fractiei fixe (Constant Fraction Timing (CFT)), metoda compensarii timpului de crestere si a amplitudinii (Amplitude and Rise Time Compensated Timing (ARC)). Precizia acestor metode depinde de panta semnalului si nivelul zgomotului, panta semnalului fiind in directa legatura cu timpul de crestere al semnalului. Acest capitol reprezinta o analiza analitica a multiplexarii comandate de semnal cu scopul de a identifica parametrii de proiectare cu cel mai mare impact asupra timpului de crestere al semnalului de iesire.

Multiplexarea comandata de semnal - analiza sistemului. Analiza se bazeaza pe formalismul transformatei Laplace aplicat unui model simplificat al circuitului de multiplexare. Pentru obtinerea circuitului simplificat, dioda Schottky (componenta principala

a multiplexorului) este inlocuita cu circuitul echivalent de semnal mic, constand in elemente pasive de circuit precum rezistenta si capacitatea dinamica. In model sunt incluse de asemenea si elementele parazite de circuit (rezistenta, capacitate si inductanta), ale caror valori sunt extrase din modelul SPICE furnizat de producator.

Funcția de transfer a sistemului se calculeaza in baza acestui model simplificat. Polii si zerourile sistemului sunt calculate pentru o plaja larga de valori a parametrilor de proiectare iar $y(t)$, raspunsul sistemului la semnal treapta este in final calculat pe baza polilor si zerourilor. Toate aceste raspunsuri sunt analizate, timpul de crestere fiind calculat pentru fiecare set de valori iar concluziile sunt centralizate pentru fiecare parametru.

Datorita complexitatii calculului functiei de transfer, un program software a fost dezvoltat in Python, bazat pe bibliotecile *NumPy* si *Sympy*, specializate in calcul algebric si numeric asistat de calculator. Software-ul dezvoltat a fost folosit pentru calculul functiilor de transfer si a raspunsului la semnal treapta cat si la prelucrarea datelor obtinute si gestionarea fisierelor.

Capacitatea dinamica a diodei, C_d , depinde de punctul static de functionare in polarizarea directa. Pentru variatii mici in jurul valorii de 0.3 pF, ceea ce corespunde unui curent mic prin dioda, raspunsul sistemului la semnal treapta variaza semnificativ, de la raspuns "aproape neted" pana la oscilatii puternice. Concluzia analizei este ca C_d este un parametru important in functionarea sistemului, fiind astfel foarte sensibil la variatii mici ale acestui parametru.

Rezistenta dinamica a diodei, R_d , depinde de asemenea de punctul static de functionare. Aceasta afecteaza frontul crescator, cel descrescator cat si maximumul raspunsului sistemului. Analiza R_d si C_d arata ca performanta maxima de timp trebuie cautata in regimul de polarizare directa, cu valori mici ale tensiunii, apropiate de $V_f = 0V$.

Inductanta parazita a diodei Schottky nu are un impact semnificativ asupra semnalului de iesire pentru o plaja larga de valori plauzibile, $L \in [0.5; 2]nH$.

Rezistenta parazita a diodei Schottky nu are un impact semnificativ asupra semnalului de iesire pentru o plaja larga de valori plauzibile, $R_s \in [2; 10]\Omega$.

Analiza **inductantei parazite** a traseelor circuitului imprimat arata ca acest parametru are o influenta semnificativa asupra raspunsului sistemului. Pentru minimizarea atat a inductantelor parazite cat si a capacitatii parazite a circuitului imprimat, primul etaj de amplificare din lantul electronic trebuie plasat cat mai aproape de matricea SiPM, ideal pe aceeasi cartela. Acest lucru reduce lungimea traseelor si elimina capacitatea parazita a conectorilor intermediari dintre cartele.

Capacitatea de intrare a amplificatorului operational are o influenta semnificativa asupra raspunsului sistemului. O atentie deosebita trebuie acordata proiectarii circuitului imprimat deoarece capacitatile parazite se vor adauga capacitatii de intrare. Desi amplificatoare operationale precum AD8012 au o capacitate de intrare de doar 2.3pF, capacitatea parazita poate usor atinge valori apropiate de cea a amplificatorului, dubland astfel capacitatea de intrare.

Analiza **rezistentei de intrare** a amplificatorului operational, R_i , arata ca aceasta nu are un impact semnificativ asupra raspunsului sistemului pentru o plaja larga de valori, $R_i \in [3; 9]M\Omega$.

N, numarul celulelor SiPM din grup are un impact puternic asupra raspunsului sistemului, afectand atat panta si timpul de crestere cat si amplitudinea semnalului de iesire. Astfel, N este un parametru important in proiectare. Proiectantul trebuie sa puna in balanta beneficiile unui N mic, cum ar fi performanta de timp si beneficiile unui N mare, cum ar fi o electronica supla.

Chiar daca **rezistenta serie echivalenta a SiPM-ului**, R_p , este un parametru care nu este sub controlul direct al proiectantului si nici nu este specificat de producator, a fost inclus in analiza, pentru a oferi o intelegere completa a sistemului. Analiza acestui parametru arata ca variatia lui are un impact asupra raspunsului sistemului, valori mari ale sale micșorand timpul de crestere. Coada semnalului este si ea afectata de acest parametru.

Impactul C_p , **capacitatea de iesire a SiPM**, nu are un impact asupra frontului crescator al semnalului ci doar asupra cozii sale. Aceasta inseamna ca performanta de timp a sistemului nu este afectata dar ar putea reprezenta un inconvenient prin limitarea ratei de numarare a acestuia. Valorile mici, specifice capsulelor de 1x1mm pot reduce latimea pulsurilor marind numarul de celule necesar pentru acoperirea aceleiasi suprafete.

Analiza asupra valorii **rezistentei de polarizare a diodei Schottky** arata ca aceasta nu are nici un impact asupra semnalului de iesire pentru o plaja larga de valori rezonabile, $R_{sch} \in [5; 20]k\Omega$. Totusi, trebuie avut in vedere ca valoarea sa modifica punctul de functionare al diodelor si implicit R_d si C_d . In anumite cazuri disiparea termica poate deveni o problema si trebuie luata in calcul, in special in cazul circuitelor care functioneaza in vid.

Pentru analiza circuitului s-a preferat abordarea analitica in defavoarea simularii de tip SPICE deoarece modelul analitic ofera informatii suplimentare cu privire la regimul tranzitoriu rapid, care de multe ori nu este vizibil in analiza SPICE. Harta pol-zero ajuta la o intelegere mai profunda a comportarii sistemului prin indicarea existentei in semnal a unor componente cu pondere redusa, care pot deveni dominante in anumite conditii, in

timp ce analiza SPICE ar fi oferit doar un raspunsul final $y(t)$, mascand componentele mentionate. Se poate concluziona ca analiza arata care sunt parametrii importanti si care este impactul lor, atat in mod absolut cat si relativ, asupra raspunsului sistemului.

Parametri si masuratori specifice sistemelor de detectie a radiatiei

Semnalul de iesire al unui detector de radiatie poate contine informatii despre energia particulei care a generat semnalul, momentul de timp in care particula a intrat in volumul activ al detectorului si/sau uneori despre pozitia interactiei in interiorul detectorului. Masuratorile de energie sunt utile in aplicatiile de spectroscopie cum ar fi identificarea izotopilor in baza spectrului de dezintegrare, spectrul particulelor de energie mare in astrofizica sau identificarea fragmentelor rezultate din fisiune nucleara.

Pentru a putea intelege rezultatele masuratorilor este important inainte de toate sa fie intelesi factorii care influenteaza insasi masuratoarea, cum ar fi fluctuatiile statistice si zgomotul precum si parametrii specifici detectoarelor si limitarile acestora. Toate acestea pot avea un impact semnificativ asupra rezultatelor finale si trebuie analizate in timpul procesului de caracterizare a detectorului, imediat dupa testarea preliminara a functionarii acestuia.

Orice masuratoare a unei marimi fizice este supusa unei variabilitati care se va traduce printr-o eroare la nivelul rezultatelor finale. Exista numeroase modele statistice care pot descrie natura statistica a fenomenelor. Distributia binomiala, distributia Poisson si distributia normala Gauss sunt cele mai importante si comune modele, jucand un rol important in fizica nucleara si a masuratorilor specifice acesteia. Indiferent de complexitatea modelului ales, acesta este caracterizat de o functie de probabilitate, o valoare medie μ si o abatere medie σ^2 .

Distributia binomiala se aplica in special experimentelor care au doua evenimente posibile, cum ar fi aruncarea unei monede sau dezintegrarea radioactiva a unui nucleu. **Distributia Poisson** este un caz particular al distributii binomiale, in fizica nucleara fiind folosita pentru descrierea reactiilor particulelor si a dezintegrarii nucleelor. **Distributia normala (Gauss)** este o distributie continua si simetrica, derivata din distributia binomiala. In electronica nucleara isi gaseste aplicatii in masuratorile electrice ale curentilor si tensiunilor, toate avand prezenta o componenta de zgomot.

Sistemele electronice au intotdeauna prezent un nivel de zgomot care le limiteaza performanta. Zgomotul are mai multe surse si iar comportarea acestuia este caracterizata de spectrul de putere in functie de frecventa.

Zgomotul termic este cauzat de miscarea termica a purtatorilor de sarcina si este de obicei produs de elementele rezistive de circuit. **Zgomotul 1/f** este prezent in toate dispozitivele electronice active dar si in multe din cele pasive. **Zgomotul de alice** este prezent in cazul sarcinilor electrice care traverseaza o bariera de potential cum ar fi in cazul jonctiunii *pn*. **Zgomotul in salve** se datoreaza imperfectiunilor din semiconductor si implantarii de ioni grei in semiconductor si este caracterizat de impulsuri de frecventa ridicata la rate variabile, in timp ce amplitudinea, de cateva ori mai mare decat zgomotul termic, ramane constanta. **Zgomotul in avalansa** este generat de jonctiunile *pn* care exploateaza fenomenul de strapundere prin avalansa, cum ar fi diodele Zener sau SiPM-urile, si care sunt polarizate invers.

Terminologia pulsurilor electronice cat si proprietatile detectoarelor sunt studiate si documentate intrucat reprezinta o baza comuna pentru caracterizarea si compararea detectoarelor dezvoltate cu cele existente. Lucrarea trateaza urmatorii parametri importanti: nivelul de referinta (eng. baseline), amplitudinea pulsului, zgomotul nivelului de referinta, frontul crescator si timpul sau de crestere, frontul descrescator si timpul de cadere, latimea pulsurilor si tipurile acestora. Proprietatile detectoarelor: modul de operare, functia de raspuns, sensibilitatea, raspunsul detectorului la tipurile de radiatie, rezolutia energetica si de timp, factorul Fano, latimea la jumatatea inaltimii (FWHM), timpul de raspuns si timpul mort, sunt cele considerate relevante pentru lucrare.

Cea mai frecventa forma de a prezenta rezultatele finale ale unei masuratori de spectroscopie este sub forma **spectrului diferential de amplitudine a pulsurilor**. Pentru obtinerea unui spectru de energie este nevoie de un ansamblu de module electronice specializate si de un software dedicat pentru analiza datelor. Un astfel de aranjament experimental, folosit pentru caracterizarea detectoarelor de radiatie realizate cu SiPM si cristal $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, consta in detector, al carui semnal de energie este conectat la un amplificator spectroscopic urmat de un analizor multicanal. In mod convenabil, osciloscopul HDO4104 MS este folosit pentru achizitia si procesarea datelor.

In masuratorile nucleare, timpul unui eveniment este relevant doar in raport cu timpul unui alt eveniment. Exista mai multe metode pentru marcarea momentului de timp la care are loc un eveniment atunci cand un puls analogic este disponibil. Cele mai folosite metode sunt i) metoda pragului pe frontul crescator (LE) ii) metoda trecerii prin zero iii) metoda fractiei constante (CFD) si iv) metoda compensarii amplitudinii si a timpului de crestere (ARC). Circuite electronice specializare si tehnici de procesare software sunt ulterior folosite pentru a determina de exemplu daca doua evenimente sunt sau nu coincidente. Toate masuratorile de timp sunt afectate de **jitter**, cauzat de prezenta in semnal a zgomotului.

Analiza datelor

Pe parcursul acestei lucrari au fost realizate numeroase masuratori. Primul set de masuratori a avut scopul de a determina contributia fiecarei componente a sistemului la timpul de crestere al semnalului rapid. Al doilea set de masuratori s-a concentrat pe influenta zgomotului asupra performantei de timp si energie. Al treilea set de masuratori reprezinta datele experimentale, realizate la acceleratorul Tandem de la IFIN-HH si consta in date de caracterizare, calibrare si din experiment.

Masuratorile de laborator

Este cunoscut faptul ca dimensiunea cristalului scintilator are o influenta semnificativa asupra performantei de timp a detectorilor (eng. Coincidence Resolving Time (CRT)), iar literatura stiintifica abunda in articole bazate atat pe date experimentale cat si pe simulari, pentru diferite tipuri de cristale si configuratii ale detectoarelor. Totusi, masuratorile directe ale contributiei drumului optic prin cristal sunt putine iar date experimentale pentru $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, izolat sau in combinatie cu o matrice SiPM nu au fost identificate. Astfel, un experiment pentru masurarea **influenta drumului optic prin cristal** asupra timpului de crestere a fost pus in practica.

In acest experiment, pulsuri de lumina sunt injectate in cristalul scintilator printr-o fanta realizata ca urmare a deplasarii laterale a sensorului optic, mentinand in acelasi timp cuplajul optic intre matricea SiPM si cristal. Lumina a fost injectata sub diverse unghiuri, folosind cristale de diferite dimensiuni, iar influenta acestor parametri asupra timpului de crestere a fost studiata. Rezultatele indica o contributie la timpul de crestere de $6 \div 8$ ns, reprezentand timpul necesar pentru colectarea fotonilor optici care defineste astfel o limita pentru timpul de crestere al detectorului in ansamblu.

Pentru a caracteriza componentele electronice ale detectorului, masuratori ale **timpului de crestere** pentru semnalele rapide au fost realizate prin iluminarea matricii de SiPM cu pulsuri luminoase foarte scurte, furnizate de un sistem laser ALPHALAS LD-510-50. Valorile masurate pentru timpul de crestere folosind aceasta configuratie sunt $t_r \approx 1.75$ ns. Masuratorile au fost facute fie iluminand uniform toata matricea fie expunand un numar de celule (1, 2, 4, 8), din acelasi grup sau din grupuri diferite. Rezultatele nu au aratat diferente semnificative intre aceste cazuri. Astfel, lantul electronic nu limiteaza timpul de crestere al semnalului rapid.

In primele experimente realizate de C. Mihai si G. Pascovici cu matrice de SiPM, valorile pentru timpul de crestere al semnalelor rapide au fost $t_r = 15 \div 23$ ns. Influenta capacitatii C_d a diodei Schottky din configuratia de multiplexor comandat de semnal asupra timpului de crestere a fost deja identificata si optimizata in aceste prime experimente, concluziile autorilor fiind deja publicate in articole de specialitate. Analiza realizata in

Cap. 3 demonstreaza ca R_d , rezistenta dinamica a diodei, joaca un rol foarte important in definirea timpului de crestere, iar punctul de minim al performantei de timp trebuie cautat tinand cont de ambii parametri. G. Pascovici a identificat diodele BAT15-04W ca fiind cea mai buna alegere pentru capacitatea diodei si astfel reducerea suplimentara a timpului de crestere se poate face doar prin ajustarea rezistentei dinamice. In cadrul lucrarii, prin ajustarea punctului de functionare al diodei, se obtine in final o reducere a timpului de crestere pana la $t_r = 8.5$ ns pentru o matricea de 1.5" in timp ce pentru matricea de 2" timpul de crestere coboara la 10 ns.

Concluzia masuratorilor asupra timpului de crestere arata ca matricea SiPM si electronica asociata au o banda de trecere pentru semnalele rapide mai mare decat cea echivalenta a semnalelor provenite de la scintilator si astfel nu reprezinta un element limitator in performanta detectorului. Trebuie totusi mentionat ca aceasta banda de trecere poate deveni un inconvenient in solutia finala, deoarece permite trecerea unui zgomot de banda larga iar acest lucru se poate regasi intr-un jitter ridicat. Totusi, in acest punct al dezvoltarii detectoarelor, atentia este orientata spre imbunatatirea timpului de crestere, banda de trecere putand fi ajustata ulterior si astfel nu reprezinta o problema reala.

Zgomotul nivelului de referinta este important pentru un detector deoarece are efect atat in masuratorile de energie cat si in cele de timp, limitand rezolutia masuratorilor. Ambele canale au o deplasare a referintei de doar cativa mV, ceea ce nu prezinta probleme pentru sistemele de procesare a semnalelor folosite in prezent.

Pentru canalul rapid, masuratorile sunt realizate pe o scala de $0 \div 2.5$ V si terminatie de 50Ω . Deplasarea nivelului de referinta este data de media valorilor masurate, $\mu = 3.67$ mV, in absenta impulsurilor. Amplitudinea zgomotului corespunde unei distributii normale si are o abatere standard $\sigma = 2.37$ mV, careia ii corespunde o valoare varf la varf $V_{p-p} = 15.64$ mV si FWHM = 5.57 mV, care se traduce intr-un jitter cu FWHM = 99 ps.

Pentru semnalele lente, masuratorile sunt realizate pe o scala de $0 \div 2.5$ V si terminatie de 50Ω . Deplasarea nivelului de referinta este data de media valorilor masurate, $\mu = 2.97$ mV, in absenta impulsurilor. Amplitudinea zgomotului corespunde unei distributii normale si are o abatere standard $\sigma = 1.88$ mV, careia ii corespunde o valoare varf la varf $V_{p-p} = 12.41$ mV si FWHM = 4.42 mV. Pentru un semnal cu amplitudinea de ≈ 0.33 V (corespunzator γ cu energia de 661 keV provenind de la ^{137}Cs), contributia individuala a zgomotului asupra rezolutiei energetice este de $4.42\text{mV} \div 0.33\text{V} = 1.33\%$. Tinand cont ca in cazul zgomotului contributiile se aduna patratic si avand in vedere ca cea mai buna rezolutie raportata in literatura pentru un cristal $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ este de 2.6%, se poate considera ca zgomotul nu are un impact semnificativ asupra rezolutiei energetice.

Rezolutia energetica a unui detector de radiatie γ este raportata de obicei pentru energia de 661 keV corespunzatoare unei dezintegrari β^- a izotopului ^{137}Cs . Masuratorile

la aceasta valoare de referinta au demonstrat ca rezolutia unui detector cu matrice SiPM este aceeaasi cu a unui detector cu PMT si anume 26.18(15) keV respectiv 26.31(9) keV sau, raportat la 661 keV, 3.96(2)% respectiv 3.98(1)%.

Rezolutia de timp a fost determinata folosind o sursa de ^{60}Co , caracterizata de o dezintegrare β^- , in timpul careia emite doi fotoni γ ce pot fi considerati coincidenti, cu energii de 1 173 keV si 1 332 keV. Pentru inceput, doi detectori cu PMT identici sunt folositi pentru a se masura rezolutia individuala (eng. Coincidence Resolving Time (CRT)). Semnalele de energie sunt preluate si folosite pentru a filtra doar evenimentele care au depus intreaga energie in scintilator. Perechea PMT-PMT a rezultat in CRT cu valoarea FWHM = 189.8(10) ps in timp ce perechea PMT-SiPM a rezultat in CRT cu valoarea FWHM = 187.5(10) ps. Pentru rezultate relevante, in a doua masuratoare, SiPM-ul inlocuieste unul din PMT-urile primei masuratori, pastrand insa cristalul scintilator si configuratia geometrica.

Dupa caracterizarea in laborator a detectoarelor, acestea au fost folosite pentru masuratori in cadrul experimentelor. Patru tipuri de detectoare cu scintilator $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ au fost dezvoltate in cadrul lucrarii de doctorat, 3 cristale fiind cilindrice cu diametrul de 3", 2", 1.5" iar unul fiind trunchi de con cu diametrul bazei de 1.5". Aceste detectoare sunt acum folosite in mod curent in cadrul experimentelor de la acceleratorul Tandem de la IFIN-HH, ISOLDE CERN Geneva si centrul GSI Helmholtz din Darmstadt. In lucrarea scrisa sunt prezentate spectrele de calibrare preluate in cadrul experimentelor.

Alte trei detectoare, de radiatie β , au fost realizate la comanda pentru ISOLDE-CERN, fiind instalate in punctele Tape station, IDS si WISArD. Spectre de calibrare cat si din experiment, obtinute cu aceste detectoare, sunt de asemenea prezentate in lucrarea scrisa.

Obiectivul lucrarii, acela de a imbunatati performanta detectoarelor existente si de a dezvolta solutii personalizate bazate pe SiPM acolo unde PMT-ul nu poate fi folosit, a fost atins. Contributiile personale sunt reprezentate de proiectarea, executia si instalarea in total a 7 detectoare de radiatie (beta si gama). Am dezvoltat in premiera modelul analitic pentru multiplexorul comandat de semnal si in baza lui am analizat, prin metode analitice, comportarea acestuia. Efortul depus este documentat in 6 lucrari stiintifice, 4 fiind deja publicate.

Concluzia generala a lucrarii este ca SiPM-urile reprezinta o alternativa reala la PMT-uri oferind avantaje precum robustete mecanica, dimensiuni reduse, tensiuni de alimentare mici si imunitate la campurile magnetice, fara insa a compromite performantele de timp si energie. Prin folosirea structurilor de multiplexare comandata de semnal, electronica FEE poate fi supla, reducand costul, dimensiunile si disiparea termica a intregului sistem. Fiind produse relativ noi pe piata de specialitate, comportamentul matricelor