Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Școala Doctorală de Științe Aplicate
Departamentul: Fizică
Domeniul: Științe exacte, Fizică

TEZĂ DE DOCTORAT

-REZUMAT-

SENZORI OPTICI PENTRU SECURITATE ÎN MEDII CONTAMINATE

Doctorand:
Ing. Răzvan – Marian MIHALCEA

Conducător de doctorat:
Prof. Univ. Dr. Niculae PUȘCAȘ

București
2026

CUPRINS

CAPITOLUL 1. SCURT ISTORIC, RELEVANȚA CERCETĂRILOR 3

1.1 ISTORIC 3

CAPITOLUL 2. FABRICAREA FIBRELOR OPTICE ȘI A SENZORILOR PE FIBRĂ OPTICĂ 4

2.1 CLASIFICAREA FIBRELOR OPTICE ȘI A SENZORILOR PE FIBRĂ OPTICĂ 4

2.1.1 TIPURI DE FIBRĂ OPTICĂ 4

2.1.2 METODE DE FABRICARE ALE FIBRELOR OPTICE 4

2.2 TIPURI DE SENZORI PE FIBRĂ OPTICĂ ȘI FABRICAREA ACESTORA 5

2.2.1 CLASIFICAREA SENZORILOR PE FIBRĂ OPTICĂ 5

2.2.2 FABRICAREA SENZORILOR PE FIBRĂ OPTICĂ 5

CAPITOLUL 3. SENZORI PE FIBRĂ OPTICĂ ÎN MEDII CU RADIAȚIE IONIZANTĂ 6

3.1 EFECTELE RADIAȚIEI ASUPRA FIBRELOR ȘI A SENZORILOR PE FIBRĂ OPTICĂ 6

3.1.1 EFECTUL RADIAȚIEI GAMMA ASUPRA SENZORILOR PE FIBRĂ OPTICĂ 6

3.1.2 EFECTUL RADIAȚIEI CU PROTONI ȘI NEUTRONI ASUPRA SENZORILOR PE FIBRĂ OPTICĂ 8

3.1.3 EFECTUL FASCICULELOR DE ELECTRONI ASUPRA SENZORILOR PE FIBRĂ OPTICĂ 9

CAPITOLUL 4. CONTRIBUȚII PROPRII ÎN DOMENIUL INTERACȚIEI RADIAȚIEI IONIZANTE CU SENZORI PE FIBRĂ OPTICĂ 10

4.1 CARACTERIZAREA COMPONENTELOR OPTICE LA NIVEL DE LABORATOR 10

4.1.1 INFRASTRUCTURA DE CARACTERIZARE ȘI ETALONARE ÎN LABORATOR 10

4.2 CONTRIBUȚII PROPRII ÎN DEZVOLTAREA EXPERIMENTALĂ ȘI TEORETICĂ A CERCETĂRII 11

4.2.1 NOI METODE ȘI MONTAJE DE CARACTERIZARE A SENZORILOR PE FIBRĂ OPTICĂ PLASAȚI ÎN CÂMP DE RADIAȚIE GAMMA 11

4.2.2 STUDIUL PRIVIND EFECTELE ASUPRA SENZORILOR PE FIBRA DE TIP FBG INSCRIPȚIONAȚI FOLOSIND UN LASER CU FEMTOSECUNDE EXPUȘI LA DIFERITE TIPURI DE RADIAȚIE CUM AR FI GAMMA ȘI ELECTRONI 13

4.2.3 STUDIUL PRIVIND IMPACTUL RADIAȚIE GAMMA ASUPRA UNOR SENZORI DE TIP LPG 14

4.2.4 INVESTIGAREA INTERACȚIEI RADIAȚIEI CU FIBRE DE PLASTIC 16

4.2.5 EVALUAREA EFECTELOR RADIAȚIILOR DE DIFERITE TIPURI PRODUSE UNOR FIBRE REZISTENTE LA RADIAȚII 17

4.2.6 EFECTELE RADIAȚIE GAMMA ASUPRA SENZORILOR LPG ȘI ASUPRA FILMELOR SUBȚIRI DEPUSE PESTE ACEȘTIA 19

4.2.7 IMPACTUL UNUI FASCICOL DE ELECTRONI ACCELERAȚI ASUPRA SENZORILOR DE TIP LPG CONSTRUIȚI ÎN DIFERITE FIBRE 21

CAPITOLUL 5. CONCLUZII 24

5.1 CONCLUZII GENERALE 24

5.2 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PROPRII 25

5.3 DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE 26

CAPITOLUL 6. REFERINȚE BIBLIOGRAFICE 27

CAPITOLUL 1. SCURT ISTORIC, RELEVANȚA CERCETĂRILOR

1.1 ISTORIC

Senzorii optici au luat naștere ca o necesitate a diferitor comunități de a comunica rapid. Dacă la sfârșitul secolului 18 trimiterea de mesaje dintr-un punct în altul dura ore, zile sau chiar săptămâni folosind metode convenționale, în 1792, inventatorul francez Claude Chappe a revoluționat sistemul de comunicare prin inventarea 'telegrafului optic'. În aprilie 1794 a fost deschisă prima linie ce făcea legătura între Paris și Lille, linie ce se întindea pe 190 km. În 1854 fizicianului englez John Tyndall a demonstrat că lumina poate folosi un jet de apa ca pe un sistem de direcționare a acesteia, chiar dacă acesta era curbat. Creând un zigzag în interiorul acestuia descoperă efectul de reflexie totală [1] marcând totodată prima cercetare ce atesta transmiterea ghidată a luminii și faptul că aceasta se poate „curba". În 1880 Alexander Graham Bell în colaborare cu Charles Sumner Tainter au inventat fotofonul conform articolului publicat în American Journal of Science [2]. Anul 1930 a fost marcat de Heinrich Lamm care a folosit un mănunchi de fibre pentru a transmite prima imagine cu ajutorul acestora. De la jumătatea secolului 20 fibrele optice au început să facă parte din diferite domenii și aplicații după ce în 1954 Van Heel a placat o bară de fibra, placare transparentă de indice de refracție mic ce a dus la îmbunătățirea proprietății de ghidare a undei. În 1960 Charles K Kao împreună cu colegii săi au colectat mostre de fibră de la diferiți fabricanți. Aceștia și-au dat seama că pierderile de putere în cazul fibrelor optice folosite până atunci se datorau în mare parte impurităților din sticla cu care fibrele erau fabricate [3]. Astfel, după numai câțiva ani pierderile au fost reduse până la 20 dB/km. În 2009 Charles K Kao primește premiul Nobel în fizică pentru "cercetări fundamentale în transmisia luminii prin fibre pentru comunicații optice" și este considerat "Părintele fibrelor optice". Utilizarea fibrelor în telecomunicații [4] este datorată proprietăților speciale pe care acestea le au cum ar fi: ne-liniaritate optică scăzută, lărgimea de bandă, pierderile reduse de transmisie, prag de distrugere optic ridicat, rezistența la temperaturi ridicate, comportamentul imun la electricitate și câmpuri magnetice, rezistența mecanică, îmbătrânirea lentă a materialelor, dimensiunile reduse, rezistența la intemperii. În momentul actual fibra optică domină industria telecomunicațiilor fiind cea care face conexiunea între serverele principale dintre continente. Cea mai lungă fibră optică denumită FLAG (Fibre-optic Link Around the Globe) se întinde pe aproximativ 28 000 km. Laboratoarele de profil din lume încă îmbunătățesc tehnologiile actuale prin care se transportă informația pe fibră optică ajungând la cele mai recente recorduri înregistrate în 2023 cu o viteză de până la 1.7 Pb/s [5], iar în 2024 viteza atinsă a fost de 402 Tbps experiment derulat în cadrul „National Institute of Information and Communications Technology (NICT)".

CAPITOLUL 2. FABRICAREA FIBRELOR OPTICE ȘI A SENZORILOR PE FIBRĂ OPTICĂ

2.1 CLASIFICAREA FIBRELOR OPTICE ȘI A SENZORILOR PE FIBRĂ OPTICĂ

2.1.1 Tipuri de fibră optică

Fibra optică reprezintă un ghid de undă flexibil, format dintr-un miez în general din sticlă și un înveliș. Aceasta are capacitatea de a transporta un fascicol optic pe distanțe mari, cu pierderi optice mici. Fenomenul fizic principal care stă la baza transportului fotonilor prin fibră optică este cel al reflexiei totale [1]. Pentru a avea reflexie totală, unghiul de incidență trebuie să fie mai mare decât unghiul critic prezentat în relația de mai jos.

$$(\sin^{-1} (n_{cl}/n_{cl}))$$

Alt criteriu important pentru a îndeplini condiția de reflexie totală este cel al unghiului la care raza de lumină din mediul extern intră în contact cu miezul fibrei. Acest unghi de incidență trebuie să fie mai mic decât apertura numerică (NA) definită de relația:

$$(NA) = n_a sin\alpha_m = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = 2n\Delta n$$

unde

$$\Delta n = (n_1 - n_2) \text{ iar } n = (n_1 + n_2)/2.$$

Fibrele optice sunt împărțite în două mari categorii:

- fibre monomodale cu un miez foarte îngust de 8µm-10µm: permit propagarea fotonilor printr-un singur mod și sunt utilizate la comunicații pe distanțe lungi, având lărgime mare de bandă

- fibre multimodale cu miez de 50 µm - 62.5 µm: permit propagarea simultană a mai multor moduri, prezintă dispersie ridicată și sunt utilizate la aplicații pe distanțe scurte (LAN, centre de date)

2.1.2 Metode de fabricare ale fibrelor optice

Metodele de fabricare a fibrelor optice au variat în decursul anilor odată cu descoperirea de noi tehnologii. Acestea au permis îmbunătățirea calității fibrelor optice și proceselor. Se pot enumera:

- Metoda Creuzetului unde materialele din care fibra este făcută se pun într-un creuzet de siliciu sau platină sub formă de pulberi sau bare și sunt încălzite.
- Metoda de depunere din stare de vapori care se utilizează atunci când temperatura de topire a materialelor care alcătuiesc fibra optică este prea mare pentru a folosi metoda creuzetului. Există 3 tipuri de depunere în stare de vapori a fibrelor optice: Depunere internă de vapori (Inside Vapour Deposition-IVD), depunerea externă de vapori (Outside Vapour Deposition-OVD) și depunere axială de vapori (Vapour Axial Deposition-VAD).

2.2 TIPURI DE SENZORI PE FIBRĂ OPTICĂ ȘI FABRICAREA ACESTORA

2.2.1 Clasificarea senzorilor pe fibră optică

Senzorii pe fibră optică sunt dispozitive care transformă valorile fizice ale unui fenomen pe care aceștia îl detectează, cum ar fi presiunea, temperatura, umiditatea, tensiuni mecanice, radiația, dar și altele, în modificări ale unui fascicul luminos care poate fi convertit în semnale electrice pentru a fi interpretate de un dispozitiv de măsurare și control. Senzorii pe fibră optică se pot clasifica în mai multe moduri, în funcție de diferite criterii:
După locația elementului sensibil: senzori intrinseci și senzori extrinseci.
După principiul de funcționare: senzori de intensitate, de fază, de frecvență/spectru și senzori de polarizare.
După mărimea fizică măsurată: senzori de temperatură, de presiune, de vibrații/acustici, de tensiune/deformație și senzori de curent/teren electromagnetic.
După modul de detecție: senzori punctuali sau senzori distribuiți.

2.2.2 Fabricarea senzorilor pe fibră optică

Fabricarea senzorilor pe fibră optică a prezentat un interes major încă de la crearea primului senzor de tip FBG de către Ken Hill [6] în 1978. Cei mai întâlniți, importanți și studiați senzori pe fibră optică sunt cei de tip fiber Bragg gratings (FBG).

2.2.2.1 Principiul de funcționare al senzorilor de tip FBG

În interiorul unei fibre optice sunt înscrise filtre optice cu rețea Bragg care reflectă o bandă îngustă de lungimi de undă din tot spectrul trimis prin interiorul fibrei, iar restul spectrului este transmis fără a suferi vreo modificare [7]. Modificarea indicelui de refracție și periodicitatea cu care acesta se schimbă sunt conform ecuației lui Bragg prezentată mai jos:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda_B$$

Unde n_{eff} reprezintă indicele de refracție efectiv al miezului, iar Λ_B este perioada rețelelor. Lungimea de undă Bragg aferentă ecuației prezentate anterior este reflectată în timp ce restul spectrului se propagă prin rețelele filtrului Bragg fără a suferi interferențe sau atenuări.

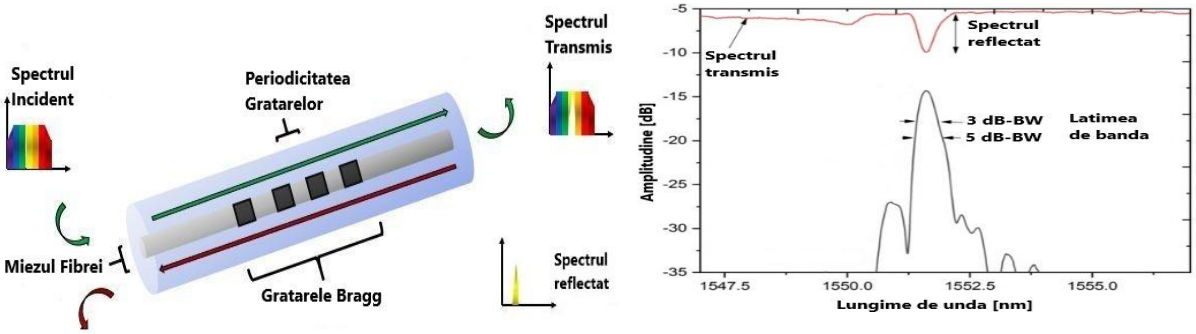


Fig.1. Schema bloc a unui senzor de tip FBG și reprezentarea grafică a acestuia

Caracteristicile principale ale senzorilor de tip FBG sunt: reflectivitatea (R), lungimea de undă centrală denumită lungimea de undă Bragg λ_B și lățimea de bandă. Reflectivitatea senzorului se poate calcula utilizând formula:

$$R_{max} = tanh^2(kL) = tanh^2\left(\frac{\pi \Delta n_{mod} \eta L}{\lambda_B}\right)$$

unde k este coeficientul de cuplare, L este lungimea filtrului cu rețele Bragg, Δn_{mod} reprezintă modificarea indicelui de refracție, η reprezintă parametrul de suprapunere a modului între învelișul fibrei și miezul acesteia.

Modularea indicelui de refracție (Δn_{mod}) indus de radiația laser este dat de ecuația:

$$\Delta n_{mod} = \frac{\lambda_B}{2\pi\eta L} ln\left[\frac{1+\sqrt{R}}{1-\sqrt{R}}\right]$$

parametrii η și k putând fi aflați din expresiile,

$$\eta = \frac{\pi^2 d^2 NA^2}{\lambda_B^2 + \pi^2 d^2 NA^2}$$

$$kL = \frac{\pi}{2}$$

unde d este diametrul miezului, iar NA este apertura numerică a fibrei folosite.

CAPITOLUL 3. SENZORI PE FIBRĂ OPTICĂ ÎN MEDII CU RADIAȚIE IONIZANTĂ

Folosirea senzorilor înscriși în fibra optică în medii contaminate sau radioactive a devenit o normalitate în zilele noastre. Acest tip de senzori sunt folosiți în infrastructuri relevante precum reactoare nucleare de cercetare, acceleratoare de particule, iradiatoare industriale, infrastructuri din domeniul spațial sau de importanță strategică.

3.1 EFECTELE RADIAȚIEI ASUPRA FIBRELOR ȘI A SENZORILOR PE FIBRĂ OPTICĂ

Este demonstrat faptul că parametrii de fabricare ai fibrelor optice și a senzorilor înscriși în acestea influențează în mod direct comportamentul lor atunci când funcționează în medii de radiație ionizantă.

Important în ceea ce privește expunerea la radiație ionizantă este și învelișul fibrei. În cele mai multe cazuri, învelișul fibrei este îndepărtat pentru crearea de noi rețele după care miezul fibrei este reacoperit de un strat protector. În timpul reacoperirii, învelișul fibrei este expus la lumina UV pentru a se solidifica mai repede, fapt ce duce la influențarea sensibilității senzorului la radiații [8]. Datorită acestor fenomene, s-au derulat diferite studii care au avut ca scop îmbunătățirea toleranței senzorilor pe fibră optică pentru diferite aplicații [9], [10], [11].

3.1.1 Efectul radiației gamma asupra senzorilor pe fibră optică

Multe dintre studiile în domeniul senzorilor pe fibră optică în câmpuri de radiație sunt făcute având radiația gamma ca principală sursă de iradiere. Înregistrarea în timp real a caracteristicilor spectrale ale senzorilor în timpul iradierii a adus în atenția cercetătorilor efectele temporare asupra senzorilor pe fibră optică în timpul unei sesiuni de iradiere. Pentru a

preveni aceste efecte temporare, au fost studiate diferite configurații experimentale și raportate în literatură [12], [13].

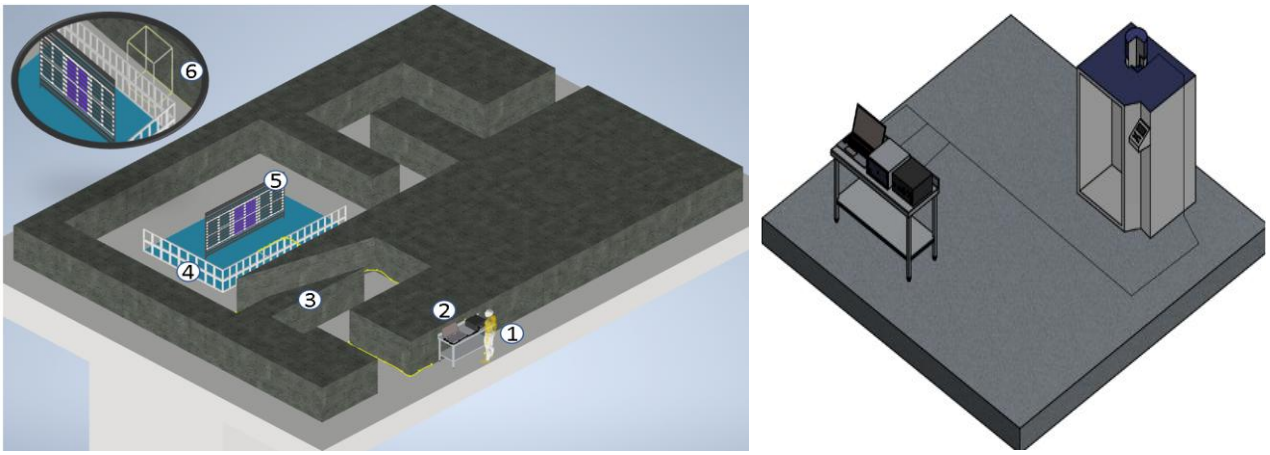


Fig.2. Reprezentarea 3D a două facilități de iradiere industrială din cadrul IFIN-HH IRASM

În figura 2 se poate observa o reprezentare 3D a unui iradiator industrial și a unui iradiator de cercetare, din cadrul Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară „Horia Hulubei".

Ambele iradiatoare au aceleași elemente, însă ele sunt dispuse diferit. Din acest motiv sunt prezentate zonele de interes doar pentru iradiatorul industrial: poziția operatorului (1) în afara zonei de iradiere, instrumentele de măsură și control, coridorul de acces către camera de iradiere (3), camera de iradiere (4), sursa Co-60 (5) și eventualele elemente ce sunt iradiate poziționate în fața sursei (6).

Experimente de iradiere cu fascicole gamma

Una din primele lucrări care tratează interacția dintre radiația gamma și senzori de tip FBG a fost publicată în luna noiembrie a anului 1994 de către P. Niay [9]. Autorii lucrării au studiat comportamentul senzorilor FBG înscriși în fibre din germaniu-siliciu expuse la radiații cu doze totale de până la 10 kGy, variind doza de la 10 Gy/h până la 130 Gy/h.

Un alt studiu de referință a avut loc în 1999 avându-l ca autor principal pe T.A. Gusarov[14], studiu ce a fost continuat în 2017 în lucrarea "Radiation-Hardened Fiber Bragg Grating Based Sensors for Harsh Environments," [15]. Autorii au studiat efectele radiației asupra sensibilității la temperatură a 7 senzori de tip FBG înscriși în fibra din siliciu dopată cu 10% germaniu.

Pentru a înțelege mai ușor efectele radiației asupra senzorilor pe fibra optică a fost creat tabelul 3 în care se poate observa răspunsul fiecărui senzor pe fibra optică în funcție de materialul din care este fibra fabricată, tipul de radiație la care este expus, dopanții prezenți în miez/ cămașa sau doza totală acumulată.

Tabelul 1. Efectele radiației gamma asupra senzorilor FBG înscriși în fibre optice în funcție de fibrele folosite pentru înscrierea acestora, dar și de metodele de fabricare a senzorilor.

Tipul de FBG	Tipul de radiație	Material fibră	Dopanți cămașă	Dopanți miez	Metoda de fabricare	Doza totală acumulată [kGy]	Modificarea lungimii de undă [pm]	REF
Tip I	Gamma	Sticlă	F, P	Ge	Laser UV	10	0.1	[9]
			B, P	Ge				
			F, P	Ge, Al				
			F	Ge, F				
Tip I	Gamma	Sticlă	-	Ge	Mască de faza	1000	25	[14]
Tip I, II	Gamma	Sticlă	-	-	Laser KrF; tratament hidrogen	100	125	[16]
			Fără	-			120	
			Fără	-			100	
			Fără	-			80	
			GeO_2, F	GeO_2			160	
			GeO_2, F	GeO_2			80	
			Fără	GeO_2			110	
			Fără	-			160	
			Fără	-			125	
			P_2O_5, F	Al_2O_3, P_2O_5,F			50	
			P_2O_5	Al_2O_3, P_2O_5 CeO_2	Laser cu excimeri		50	
			P_2O_5	GeO_2, CeO_2			110	
-	Gamma	Sticlă	F	Fără	SMF dopat cu F	200	2-20	[17]
					Mască de fază		5-20	
Tip I	Gamma	Sticlă	F	Fără	Mască de fază	250	9 - 30	[18]
							3 -16	
Tip I	Gamma	Sticlă	Ge	Fără	DTG, FBG*	33.9	~ 20	[19]
Tip II	Gamma	Polimer	-	CYTOP	Plan cu plan	120	~1200	[20]
-	Gamma	Sticlă	B	Ge	Mască de fază laser KrF	22.85	11	[21]

3.1.2 Efectul radiației cu protoni și neutroni asupra senzorilor pe fibră optică

Mediul spațial este caracterizat în principal de o varietate de radiații ionizante, fotoni, protoni, electroni sau ioni grei. Prin multitudinea de studii efectuate în ultimii ani [97], [98], [99], s-a

ajuns la concluzia că răspunsul la radiație furnizat de fibra optică sau dispozitivele bazate pe fibră este influențat în principal de sensibilitatea la doza totală de ionizare [100].

Pentru o vedere mai amplă asupra subiectului, informații din acest capitol vor fi prezentate în tabelul 2 din următorul capitol.

3.1.3 Efectul fasciculelor de electroni asupra senzorilor pe fibră optică

Plecând de la aplicații, raportând în același timp efectele unui fascicol de electroni asupra unor senzori de tip FBG scriși în fibre optice rezistente la radiații, lucrarea lui D. Sporea [22] este una dintre puținele [23] care discută și atinge acest subiect. Autorii lucrării au identificat nevoia de a diagnostica în timp real de la distanță un fascicol de electroni.

În următorul tabel sunt centralizate datele privind interacțiunea dintre diferite tipuri de radiație și multiple fibre optice în care sunt înscriși diverși senzori.

Tabelul 2. Efectele radiației ionizante asupra senzorilor înscriși în diferite tipuri de fibre optice prin diferite procedee.

Tipul de FBG	Tipul de radiație	Material fibră	Dopanți cămașă	Dopanți miez	Metoda de fabricare	Doza totală acumulată [kGy]	Modificarea lungimii de undă [pm]	Ref.
-	Protoni	Sticlă	-	Ge	Laser Ar	100	20	[24]
Tip I	Protoni	Sticlă	-	Ge	DTG Laser cu excimeri	15000	-3 -14	[25]
Tip II							206 - 359	
Tip I							10 - 334	
Tip I	Protoni	Sticlă	-	Ge	DTG Laser cu excimeri	100	30 -70	[26]
Tip I								
Tip I	Raze X	Sticlă	Fără	Ge Conținut Ridicat	Laser UV Tratament Cu Hydrogen	500	~ 230	[23]
	Electroni						~ 155	
	Raze X					10	~ 40	
	Protoni						~ 25	
	Raze X			Ge Conținut Scăzut	Laser UV Tratament Cu Hydrogen	500	~ 200	
	Electroni						~ 190	
	Raze X					10	~ 30	
	Protoni						~ 15	
	Raze X			Ge, B	Laser UV	10	~ 16	
	Protoni						~ 12.5	
	Raze X					500	~ 50	
	Electroni						~ 250	
	Raze X			P, Ce	Laser UV Tratament Cu	10	~ 11	
	Protoni						~ 4	
	Raze X					500	~ 170	

	Electroni				Hydrogen		~ 60	
Tip I	Protoni	Sticlă	-	Ge	Laser UV	0.472	± 40	[27]
Tip II					Laser FS			
Tip II				-				
Tip I	Neutroni	Sticlă	-	Ge	Laser UV		Fără Modificări	
Tip II					Laser FS			
Tip II				-				
Tip I	Neutroni și gamma	Sticlă	-	F	Laser FS	$5*10^{19}$ n/cm^2	~ 40	[28]
-	Neutroni și gamma	Sticlă	-	Ge (5%)	-	$5*10^{19}$ n/cm^2 gamma $2*10^6$	< 1.5	[29]
				Ge (20%)				
				Ge, B SMF-28				
-	Electroni	Sticlă	-	Ge SMF-28	FBG* Interferometrie Laser FS	8	180	[22]

CAPITOLUL 4. CONTRIBUȚII PROPRII ÎN DOMENIUL INTERACȚIEI RADIAȚIEI IONIZANTE CU SENZORI PE FIBRĂ OPTICĂ

4.1 CARACTERIZAREA COMPONENTELOR OPTICE LA NIVEL DE LABORATOR

Contribuțiile proprii în ceea ce privește studiul fibrelor optice și a senzorilor pe fibră optică în diferite câmpuri de radiații își au originile în cadrul laboratorului de fibre optice din CETAL, INFLPR. Acesta beneficiază de o infrastructură bogată în echipamente pentru testarea și caracterizarea fibrelor optice și a senzorilor pe fibră optică, folosind tehnici de investigare în transmisie sau reflexie.

4.1.1 Infrastructura de caracterizare și etalonare în laborator

Laboratorul deține multiple echipamente pentru investigarea fibrelor și a senzorilor pe fibră optică, echipamente care pot funcționa în mod independent, dar și în mod combinat obținând diferite informații utile despre eșantioanele testate și caracterizate.

Interogatoarele optice disponibile au următoarele specificații:

Tabelul 3. Prezentarea principalelor caracteristici ale interogatoarelor optice folosite și scoaterea în evidență (culoarea verde) a principalelor avantaje pe care fiecare le prezintă.

Caracteristici principale	Micron Optics	Ibsen Photonics	Femto Sensing
Domeniul spectral [nm]	1510-1590	1510-1595	1528-1568
Rezoluție spectrală [pm]	1	5	10
Frecvența de achiziție [Hz]	1	3000	1000
Numărul de canale	4	1	4
Interval dinamic dB	50	15	25
Sursa de lumină integrată	DA	NU	DA
Dimensiuni reduse	DA	DA	DA
Total avantaje	6	3	2

Pentru caracterizarea spectrală a senzorilor pe fibră optică este folosit și un reflectometru optic produs de compania LUNA Inc. (U.S.A), modelul OBR 4600 având domeniul spectral cuprins între 1525 și 1610 nm. Tot pentru caracterizarea spectrală în cadrul laboratorului se regăsesc două analizoare de spectre având diferiți producători, însă cu specificații similare. Acestea ies în evidență prin capacitatea lor de a citi un domeniu spectral lărgit care în cazul de față este cuprins între 600 și 1750 nm.

Pe lângă echipamentele de bază care sunt folosite la interogarea senzorilor, în laborator se mai găsesc și echipamente complementare cum ar fi: Aparat de sudat fibre Easy Splicer PRO, microscop pentru conectori de fibră optică Thorlabs FS201, Etuva Memmert UM 400 care ajută la calibrarea senzorilor cu temperatură, chituri de curățare a conectorilor, conectori și fibre de conexiune cu diferite metraje.

4.2 CONTRIBUȚII PROPRII ÎN DEZVOLTAREA EXPERIMENTALĂ ȘI TEORETICĂ A CERCETĂRII

Cu ajutorul colegilor din cadrul laboratorului de Investigații Fotonice din CETAL, INFLPR și a colaboratorilor atât interni, cât și externi, au fost publicate o serie de lucrări științifice în diferite jurnale de specialitate. Au fost publicate atât articole cu factor de impact, cât și lucrări de tip „Proceeding”. În continuare vor fi prezentate câteva articole reprezentative și discutate rezultatele obținute.

4.2.1 Noi metode și montaje de caracterizare a senzorilor pe fibră optică plasați în câmp de radiație gamma

Șirul lucrărilor științifice în care am fost direct implicat, având ca scop studierea interacțiunii radiației de diferite tipuri și fibre optice ori senzori pe fibră optică, a început în anul 2020 cu lucrarea „A New Setup for Real-Time Investigations of Optical Fiber Sensors Subjected to Gamma-Rays: Case Study on Long Period Gratings” [30].
Lucrarea relatează implementarea unui nou montaj experimental pentru investigarea în timp real a fibrei optice și a senzorilor pe fibră optică în timpul expunerii la o sursă gamma. În comparație cu studiile anterioare, această configurație are câteva avantaje majore, precum stabilitatea termică crescută, stabilitatea ratei de doză, stabilitatea conexiunilor optice și fixarea traseului optic. Aceste avantaje conduc la o reproductibilitatea crescută a experimentelor.

Iradierea a avut loc la IFIN-HH unde au fost folosite două tipuri de iradiatoare gamma. Rezultatele obținute din monitorizarea în timp real a efectelor radiațiilor asupra senzorilor pe fibră optică produse de un iradiator gamma de cercetare GC-5000 Co-60 (B.R.I.T., Maharashtra, India) au fost comparate cu cele obținute utilizând un iradiator gamma industrial SVST Co-60/B (Institute of Isotopes, Budapesta, Ungaria).
În urma prelucrării și analizării datelor se pot trage următoarele concluzii în conformitate cu graficele prezentate mai jos. După cum se poate observa în cele două imagini, spectrele senzorilor au fost salvate atât înainte, cât și după iradiere.

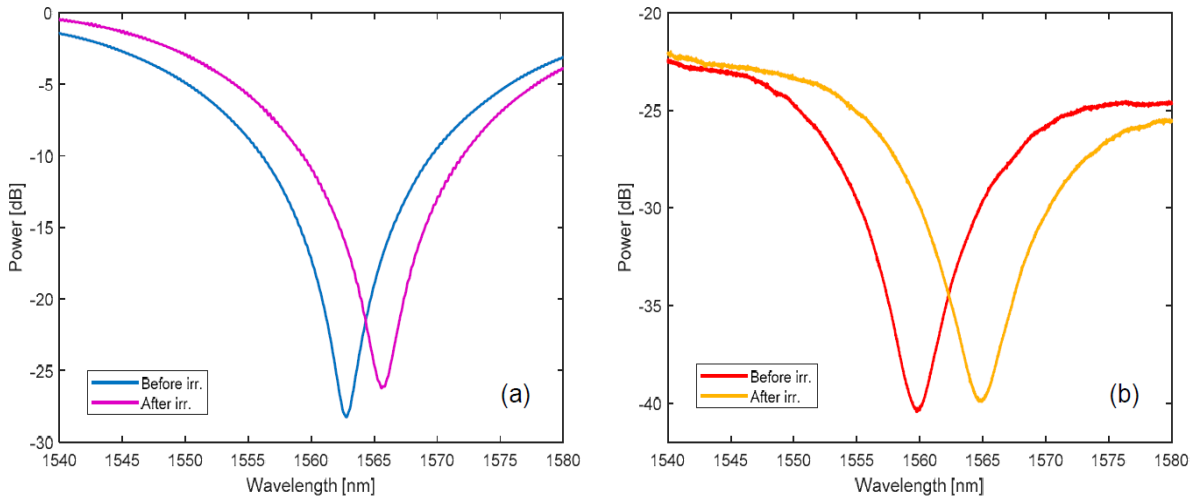


Fig. 3. Compararea spectrelor înainte și după iradiere a) Pentru iradiatorul industrial SVST Co-60; b) Pentru iradiatorul de cercetare GC-5000 [30]

În ambele cazuri lungimea de undă centrală a senzorilor LPG a migrat spre dreapta. Acest lucru se datorează creșterii indicelui de refracție al miezului fibrei optice în timpul iradierilor. În cazul iradiatorului industrial, la o doză totală acumulată de 35 kGy a senzorilor LPG, lungimea de undă a acestora s-a modificat cu 3.7 nm. Experimentul derulat cu iradiatorul de cercetare GC-500 a dus la o modificare a lungimii de undă cu 4.7 nm pentru o doză totală acumulată a senzorilor de 52.6 kGy.
În această lucrare au fost raportate efectele radiației de tip gamma asupra unor senzori pe fibră optică de tip LPG, scrișI în fibra monomod standard SMF28, utilizând două montaje diferite. Folosirea unui iradiator de cercetare GC-5000 la iradierea senzorilor pe fibră și monitorizarea acestora în timp real a fost o premieră. Acest experiment a fost comparat cu unul derulat în aceeași perioadă la un iradiator industrial SVST Co-60/B. Folosind același tip de senzori LPG, a fost remarcat faptul că iradiatorul de cercetare GC-5000 este mult mai potrivit pentru aceste experimente metrologice având avantaje precum stabilitatea termică, omogenitatea câmpului de radiații, izolarea senzorilor de posibile interferențe exterioare. Acestea susțin utilizarea montajului care folosește iradiatorul de cercetare prezentat pentru activități care își propun studierea efectelor radiației asupra senzorilor pe fibră optică prin controlarea simplă și precisă a parametrilor de iradiere.

4.2.2 Studiul privind efectele asupra senzorilor pe fibra de tip FBG inscripționați folosind un laser cu femtosecunde expuși la diferite tipuri de radiație cum ar fi gamma și electroni

Cea de-a doua lucrare, publicată în anul 2021 este „Comparative Study of γ - and e - Radiation-Induced Effects on FBGs Using Different Femtosecond Laser Inscription Methods" [31].

În cadrul experimentelor derulate pentru acesta lucrare au fost folosiți senzori FBG înscriși prin două metode și anume PlbPl și PbP cu un laser în femtosecunde. A fost folosită fibra standard SMF28, miezul acesteia fiind dopat cu 3% germaniu.

Testarea în câmp de radiații gamma a senzorilor a avut loc la IFIN-HH folosind iradiatorul GC-5000 descris anterior. Rata de doză a fost de 5.5 kGy/h, iar doza totală acumulată pentru cei 4 senzori FBG a fost de 15 kGy măsurată folosind sistemul clasic de dozimetrie bazat pe etanol-clor-benzen (ECB).

Pentru testarea senzorilor într-un câmp de electroni a fost folosit un accelerator liniar EEV M5125 tunabil. Puterea folosită a fost de 2 MW, iar banda S a fost între 2992 și 3001 MHz. Parametrii acceleratorului au permis obținerea unei rate de doză echivalentă a 3.2 kGy/min la 60 cm față de fereastra de ieșire a acceleratorului. Doza a fost verificată cu ajutorul unui calorimetru calibrat, iar doza totală acumulată de senzori a fost de 15 kGy.

După analizarea datelor, acestea au fost comparate reieșind următoarele concluzii:

În cazul senzorului înscris prin metoda PlbPl acesta și-a modificat lungimea de undă cu 60 pm, comparativ cu senzorul înscris prin metoda PbP care și-a schimbat lungimea centrală de undă cu doar 6 pm. Senzorul FBG-PbP a suferit o scădere a coeficientului de cuplare (k) și a indicelui de reflexie. În cazul senzorului FBG-PlbPl aceste două caracteristici au crescut.

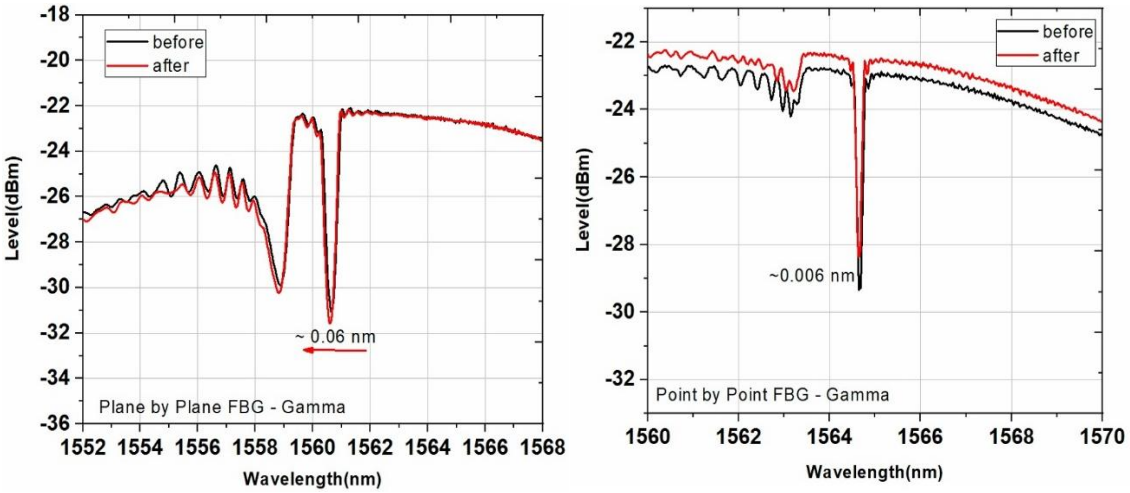


Fig. 4. Prezentarea spectrelor înainte și după expunerea senzorilor FBG la radiație gamma; în partea strângă a fost folosită metoda PlbPl pentru înscrierea acestora, iar în dreapta PbP[31].

Senzori având caracteristici similare au fost testați și în câmp de radiații cu electroni, iar aceștia s-au comportat similar cu expunerea la gamma. De menționat este faptul că senzorul FBG-PbP a avut o modificare mult mai mare a lungimii centrale de undă cu 224 pm în comparație cu senzorul FBG-PlbPl care și-a modificat lungimea de undă cu doar 52 de picometri.

Comportamentul acestor senzori expuși la radiație cu electroni poate fi observat în imaginea 5 care prezintă spectrele acestora.

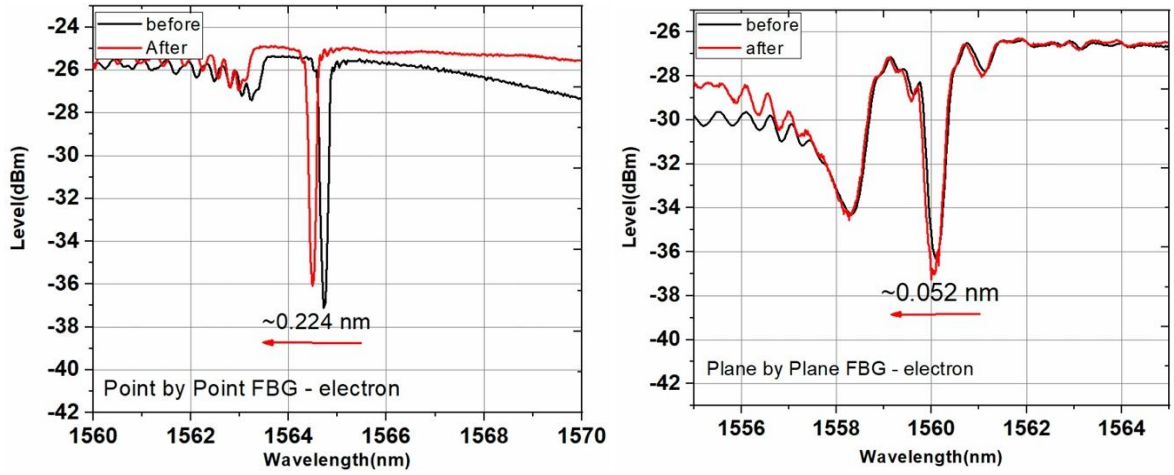


Fig. 5. Prezentarea spectrelor înainte și după expunerea senzorilor FBG la câmpul de electroni; în partea strângă a fost folosită metoda PbP pentru înscrierea acestora, iar în dreapta PlbPl[31].

În urma examinării datelor și a graficelor prezentate mai sus, odată cu expunerea senzorilor la radiație gamma se poate observa o ușoară creștere a coeficientului termic în cazul senzorului înscris folosind metoda PlbPl de la 10.22 pm/^{O}C până la 10.45 pm/^{O}C, în timp ce senzorul înscris prin metoda PbP își păstrează același coeficient termic. La expunerea senzorilor într-un fascicol de electroni, coeficientul termic al acestora s-a schimbat în cazul ambilor senzori. Senzorii scriși prin metoda PlbPl au avut o creștere de 9.19% a coeficientului termic, iar cei înscriși prin PbP 12.91%. După efectuarea acestor teste, au fost făcute și investigații FTIR care se regăsesc în lucrare [31].

Lucrarea menționată mai sus a fost prima în care a fost abordat efectul a două tipuri de radiație ionizantă (gamma și electroni) asupra unor senzori de tip FBG înscriși prin două metode diferite (PbP si PlbPL).

4.2.3 Studiul privind impactul radiație gamma asupra unor senzori de tip LPG

Cea de-a treia lucrare științifică publicată în cadrul Doctoratului are titlul “The Impact of Gamma Irradiation on Optical Fibers Identified Using Long Period Gratings”. Autorii acestei lucrări au studiat efectul radiației gamma asupra senzorilor pe fibră optică de tip LPG în fibre dopate.

Senzorii folosiți în cadrul acestui experiment sunt înscriși în diferite fibre optice (SMF28, VHS100, Draka, BGe, PSM), cu miez dopat sau simplu.

Experimentul a fost împărțit în două etape și anume înregistrarea răspunsului senzorilor în timp real fiind expuși la radiația gamma și verificarea indicelui de temperatură post iradiere. Expunerea senzorilor la sursa gamma a fost făcută pentru un total de 20 h, doza totală acumulată fiind de 52 kGy (60 în cazul senzorului Draka).

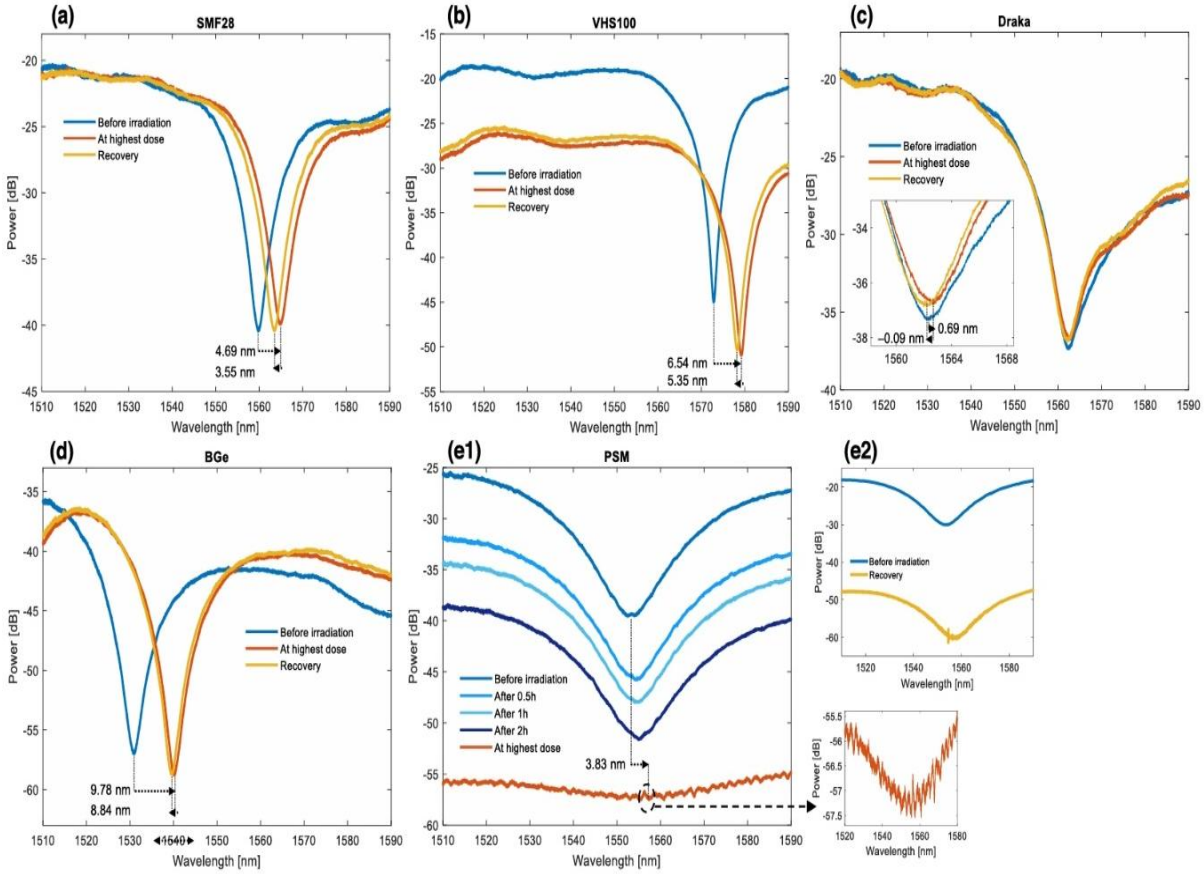


Fig. 6. Răspunsul spectral al senzorilor LPG înainte de iradiere, la ce mai mare doză acumulată și după 48h de revenire a acestora. a) SMF28, b) VHS 100, c) Draka, d) BGe. e1) folosind interogatorului SM125, e2) folosind interogatorul FS22. [32].

O caracteristică generală a senzorilor în timpul iradierii este faptul că aceștia își schimbă lungimea centrală de undă.

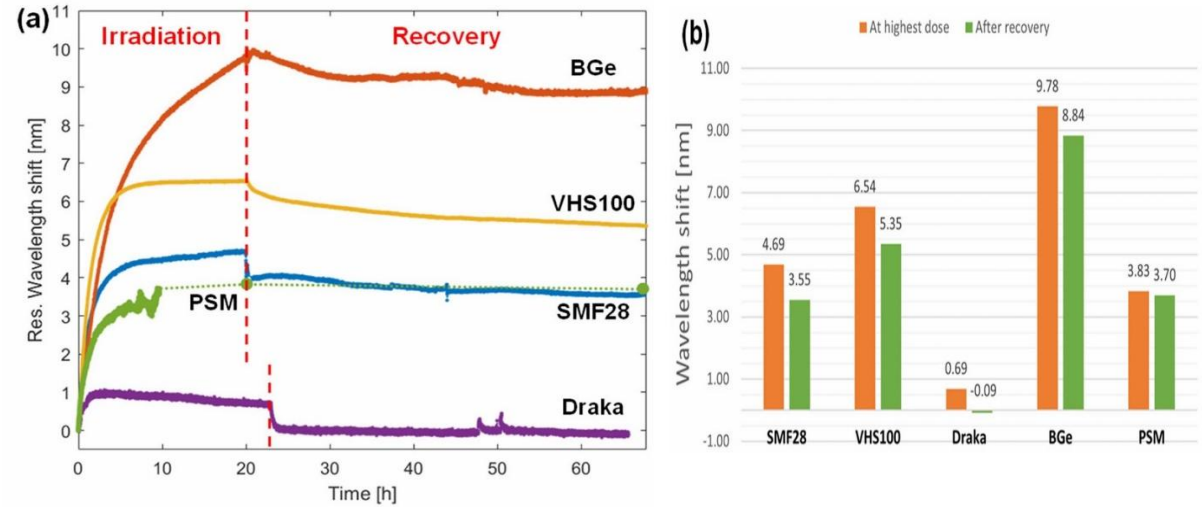


Fig. 7. a) Monitorizarea lungimii centrale de undă a fiecărui senzor LPG în timpul iradierilor și pe durata revenirii acestora. b) Modificarea lungimii de undă a fiecărui senzor la doza maximă totală acumulată și după perioada de revenire echivalentă a 48 h [32].

După o perioadă de 48 de ore de la scoaterea senzorilor din câmpul de radiație se poate vedea o ușoară tendință de revenire spre lungimea inițială de undă a senzorilor. Verificarea sensibilității la temperatură a fost făcută etalonând senzorii înainte de a fi expuși la câmpul de radiație gamma.

Discuții și concluzii:

Prin expunerea senzorilor la doze mari de radiație având rate de doze mari, a fost observat faptul că senzorii ajung repede la un prag de saturație. De asemenea, recuperarea senzorilor este și ea influențată de tipul de fibră folosit. În cazul fibrelor SMF28 și VHS100 a fost observată o revenire de 20-25% a lungimii de undă către cea inițială după două zile de la iradiere, iar la senzorul înscris în fibra Draka revenirea a avut loc în doar câteva ore.

Sensibilitatea senzorilor la radiație a fost cuprinsă între 4 și 10 nm, cea mai ridicată înregistrându-se în cazul senzorilor BGe LPG fiind de 9.78 nm, iar cea mai slabă fiind înregistrată la senzorii LPG înscriși în fibra Draka.

4.2.4 Investigarea interacției radiației cu fibre de plastic

O a patra lucrare publicată în domeniul fibrelor optice utilizate în câmp de radiații are titlul „Influence of gamma and electron radiation on perfluorinated optical fiber material composition”[33]. Această lucrare a avut ca scop studierea materialelor din care este făcută o fibră optică specială de tip „Chromis Fiberoptics Inc.” (CYPTO) și a comportamentului acestora odată cu expunerea lor la radiație de diferite tipuri. În acest caz materialele care alcătuiesc fibra sunt analizate utilizând metode spectroscopie FTIR și RAMAN. Pentru expunerea fibrelor la radiație de tip gamma, s-a utilizat o sursa tip gamma-chamber. Pentru expunerea senzorilor la un fascicol de electroni, a fost utilizat un accelerator liniar de electroni din cadrul laboratorului Acceleratori parte a INFLPR. Rata de doză în cazul iradierii cu electroni a fost de 3.2 kGy/min, iar fibrele au fost poziționate la 60 cm față de flanșa de ieșire a acceleratorului.

După expunerea fibrelor la cele două tipuri de radiație s-a realizat analiza FTIR pentru fiecare mostră iradiată verificând posibile modificări apărute în material.

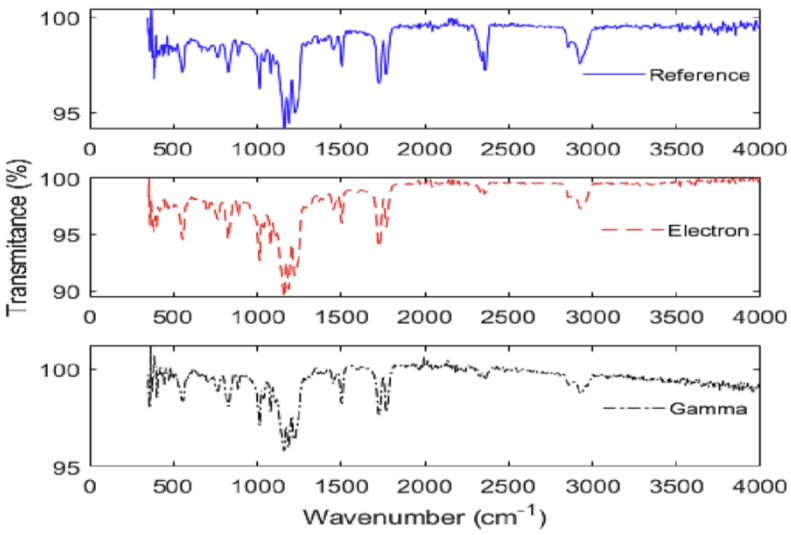


Fig. 8. Analizarea spectrală a fibrelor folosind FTIR

După cum se poate observa în urma analizelor FTIR realizate, cea mai mare diferență între fibrele iradiate și cele neiradiate este dată de transmisia fibrei optice care a suferit o modificare cu 10 % în cazul fibrei expuse la fascicolul de electroni. În urma analizelor FTIR au fost făcute și analize RAMAN pentru a confirma rezultatele anterioare. Având comparația între cele două metode de investigare a fibrelor iradiate și neiradiate, putem observa faptul că spectrele prelevate prezintă intensități mai mari în jurul acelorași valori (700, 1470, 1656 cm^{-1}). În regiunea 400-600 cm^{-1} se observă cele mai mari diferențe între probe. În cazul probelor expuse la radiația gamma și celor etalon (neiradiate) acestea au spectre similare, însă pentru probele expuse la electroni poate fi observată o diferență de intensitate considerabilă, aceasta fiind mult scăzută. În același timp în regiunea 2900 și 3200 cm^{-1} putem observa cele mai mari diferențe între probe.

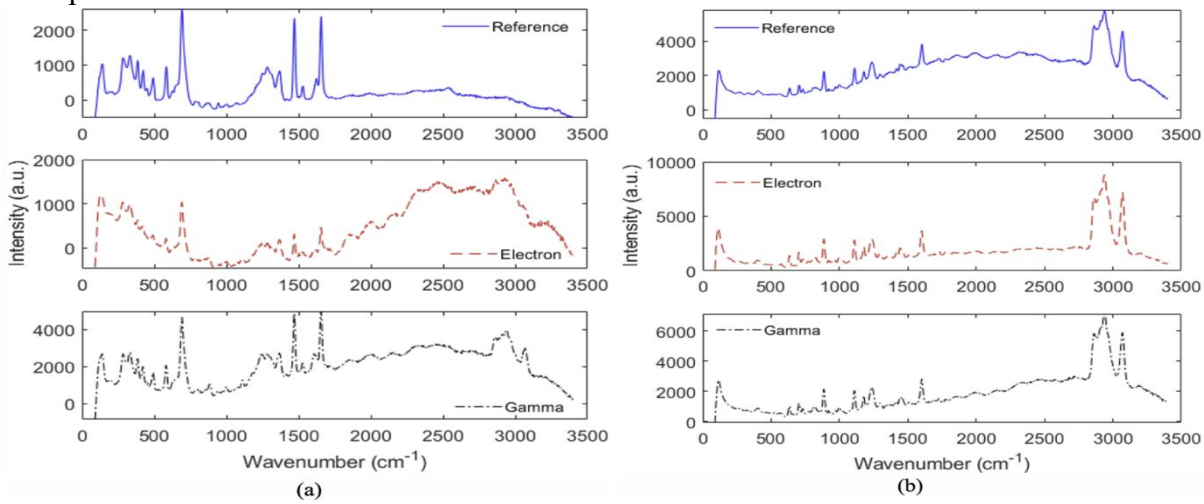


Fig. 9. Analizarea fibrelor optice cu ajutorul RAMAN, a) Analizarea miezului, b) Analizarea depunerilor atașate cămășii.

În încheierea acestei lucrări pot fi trase următoarele concluzii:

În cazul iradierii cu electroni fibra optică suferă modificări superioare celor produse de expunerea la radiația gamma. Comparând cele două tipuri de radiație în spectrele RAMAN obținute, cele mai mari variații pot fi observate în jurul valorii de 1500 cm^{-1}. De asemenea, în cazul ambelor iradieri se poate observa o modificare moleculara a fibrei CYTOP prin apariția CH_3. Aceste schimbări duc la modificarea interacției între miezul și cămașa fibrei. Absorbția materialelor care alcătuiesc fibra a crescut, fapt ce duce la scăderea transmisiei.

4.2.5 Evaluarea efectelor radiațiilor de diferite tipuri produse unor fibre rezistente la radiații

Cea de-a cincea lucrare al cărei scop a fost investigarea senzorilor pe fibră optică în câmp de radiație are titlul „Comparative evaluation of electron and gamma induced effects on FBG fabricated in standard and radiation hardened optical fibers by different techniques” [34]. În această lucrare au fost studiate efectele asupra unui număr de 4 senzori de tip FBG plasați într-un câmp de electroni și respectiv într-un câmp de radiație gamma. Pentru acest experiment au fost folosite două fibre în care au fost înscriși câte doi senzori folosind o mască de fază în timpul expunerii continue la o sursa UV. Fibrele sunt dopate cu germaniu, iar expunerea UV s-a realizat pe o lungime de 10 centimetri. În celelalte două fibre au fost înscriși senzorii cu

ajutorul unui laser cu puls în femtosecunde, fiind produși de către compania Loptek GmbH (Berlin, Germania). Fibra optică utilizată a fost comercială unimodală model FIBERCORE SM1500SC.

Pentru experimentul din cadrul acestei lucrări, au fost folosite 3 montaje experimentale.

Primul montaj experimental a fost făcut pentru calibrarea celor patru senzori cu temperatură în cadrul laboratorului de fibre optice din INFLPR – CETAL.

Cel de-al doilea montaj a fost realizat în cadrul departamentului IRASM, parte a IFIN HH unde a fost folosit un iradiatorul GC -5000 de cercetare, iar montajul este descris pe larg în lucrarea mai sus menționată [30].

Cel de-al treilea montaj experimental a fost realizat în cadrul laboratorului de Acceleratori, din cadrul INFLPR. Sursa de iradiere a fost un accelerator liniar EEV M5125 tunabil.

Pentru a trage concluziile corect asupra celor două experimente care implică radiația trebuie făcute câteva observații. Chiar dacă timpul de expunere a fost același în cazul ambelor tipuri de radiație, doza totală acumulată este diferită. De asemenea, energia electronilor este diferită față de energia radiației gamma. O impresie mai clară ne putem face din Fig. 10:

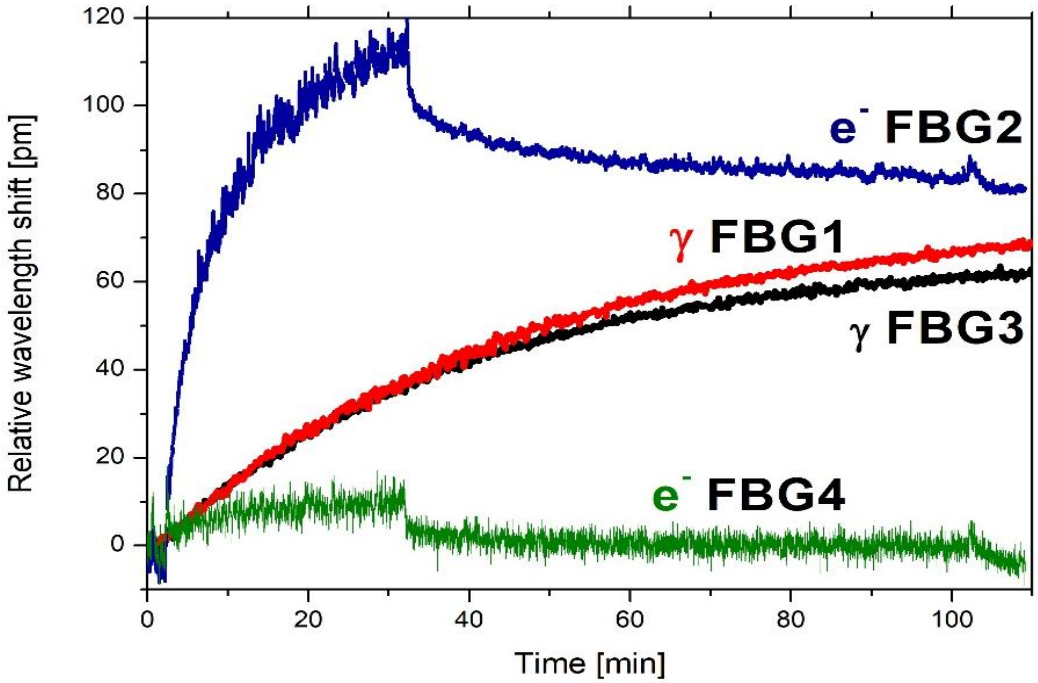


Fig. 10. Modificarea lungimii de undă Bragg a celor 4 senzori prezenți în cele două experimente de iradiere.[34]

Modificarea BWS se produce în mod exclusiv datorită efectelor resimțite de senzori la interacțiunea cu radiația deoarece efectul termic a fost extras din datele înregistrate. Acest lucru poate fi mai ușor observat în tabelul 10 acolo unde este prezentată atât tipul fibrei, metoda de fabricare, dar și comportamentul fiecărui senzor în timpul fiecărei sesiuni de iradiere.

Tabelul 4. Rezultatele iradierii celor 4 senzori [34].

Sensor No.	Fiber type	Fabrication method	Radiation type	Accumulated dose	Dose rate	BWS
FBG1	Ge-doped	Phase-mask	Gamma	56 kGy	2,45kGy/h	40pm
FBG2	Ge-doped	Phase-mask	Electrons	120 kGy	228kGy/h	120pm
FBG3	Pure silica	Fs-laser	Gamma	56 kGy	2,45kGy/h	10pm
FBG4	Pure silica	Fs-laser	electrons	120 kGy	228kGy/h	10 pm

În urma calibrării senzorilor cu temperatură în laborator, sensibilitatea acestora este de 10pm/^{o}C. Dacă pentru datele obținute în urma expunerii senzorilor la radiația gamma, compensarea rezultatelor a fost posibilă, nu putem spune același lucru în cazul expunerii la radiația de electroni. Compensarea efectului termic în cazul radiației cu electroni ar face ca datele să fie incoerente deoarece temperatura a crescut cu aproximativ 4^{o}C, ceea ce ar duce la o modificare a BWS cu aproximativ 40 pm pentru fiecare senzor conform calibrărilor din laborator. Dacă în cazul senzorului FBG2 este posibilă scăderea acestui efect, în cazul senzorului FBG4 acest lucru nu este posibil. Datele prelevate în urma iradierii implică ipoteza posibilității ca senzorul FBG4 să își modifice lungimea de undă în mod negativ, ceea ce produce o compensare naturală a temperaturii, investigații suplimentare sunt necesare.

4.2.6 Efectele radiație gamma asupra senzorilor LPG și asupra filmelor subțiri depuse peste aceștia

În cadrul consorțiului creat cu experți din Italia, Polonia și România, au fost studiate efectele radiației asupra senzorilor pe fibră optică de tip LPG care au fost personalizați prin depunerea de filme subțiri.

Pentru derularea experimentelor au fost folosiți senzori de tip LPG fabricați în fibre optice standard de la Nufern (USA) S1310 customizate pentru a fi rezistente în medii dure.

După înscrierea senzorilor, s-a procedat la depunerea straturilor pe fibră prima dată prin scufundarea acesteia pornind de la o soluție de polistiren (PS) 10% în cloroform și folosind o viteză de deplasare a fibre prin soluție de 30 mm/min. Oxizii metalici Al_2O_3,TiO_2 și filmele de Ta_2O_5 au fost și ele depuse, însă pentru asta a fi folosită tehnica de depunere atomică a straturilor (atomic layer deposition ALD) folosind sistemul Veeco Savannah S100 care a sporit gradul de uniformitate al depunerii pe fibră. După depunerea substraturilor pe fibră, lungimea centrală de undă a senzorului LPG s-a modificat cu 10 nm.

Pentru iradierea senzorilor a fost folosit montajul descris în lucrare [30], un iradiator GC-5000 de la firma BRIT din India. Pentru acest experiment a fost construit un suport special din metal care să țină fibra întinsă pe toata durata expunerii fibrelor la radiație. Rata de doză a fost de 2.3 kGy/h, iar senzorii au fost expuși pentru un total de 20 de ore. La sfârșitul fiecărei iradieri senzorii au fost ținuți sub observație pentru 5 ore, astfel fiind observate și eventualele reveniri ale acestora. Pentru a avea o referință un LPG fără depunere a fost și el iradiat în aceleași condiții experimentale.

În timpul iradierii spectrele senzorilor au fost înregistrate în timp real de către interogatorul optic, iar datele sunt prezentate în figura 11.

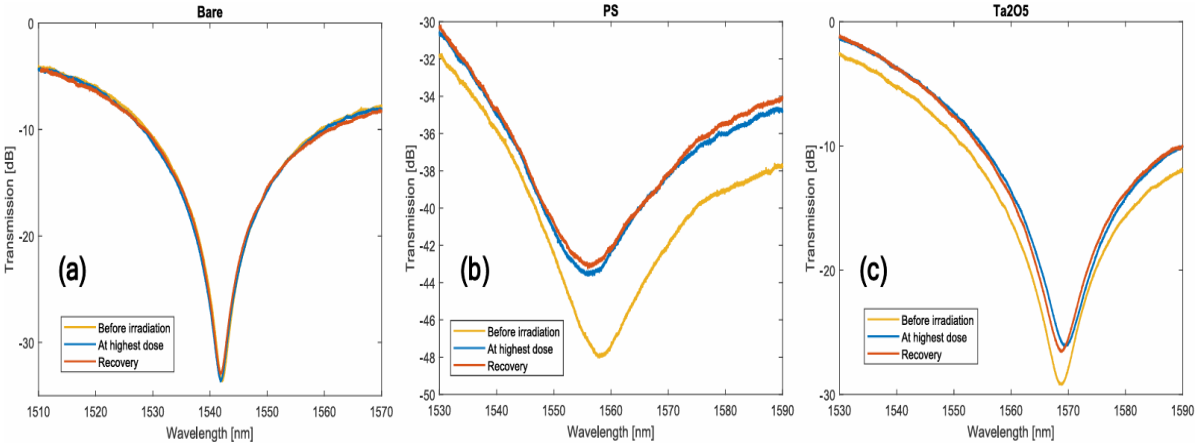


Fig. 11. Efectele radiație gamma asupra senzorilor a) Senzor LPG simplu b) LPG - PS c) LPG - Ta_2O_5 [35]

După cum se poate observa în figura 11 a, senzorul LPG simplu își deplasează lungimea centrală de undă cu 0.40 nm spre dreapta, această modificare fiind permanentă. În cazul LPG-PS (fig. 71b) se observă o schimbare a lungimii de undă cu 2.51 nm la momentul atingerii pragului maxim de iradiere cu o ușoară tendință de revenire după extragerea acestuia din zona de iradiere. Tot la senzorul LPT-PS poate fi observată o creștere a atenuării semnalului, însă aceasta nu este îndeajuns de mare cât să pună în pericol derularea experimentului sau citirea senzorului. Senzorul LPG-Ta_2O_5 prezintă de asemenea, modificări ale lungimii centrale de undă, însă de aceasta dată aceasta migrează spre stânga cu 0.51 nm. După oprirea iradierii senzorul a prezentat o revenire totală a lungimi de undă la cea inițială. Ca o scurta remarcă, după compararea senzorilor se poate observa clar că depunerile influențează modul de reacție al acestora la radiația gamma.

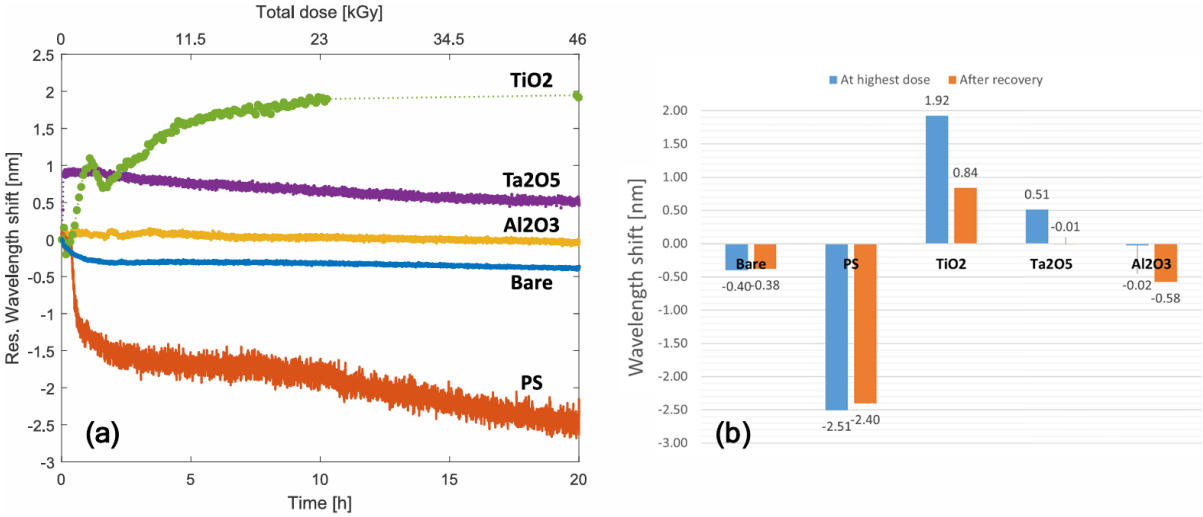


Fig. 12. Modificarea lungimilor centrale de undă în urma expunerii senzorilor la radiație gamma a) achiziționarea datelor în timp real b) monitorizarea revenirii lungimii de undă după expunere [35].

În figura 12 sunt prezentate valorile lungimilor de undă ale fiecărui senzor la atingerea dozei maxime de radiație și valorile acestora după perioada de revenire.

După cum ne așteptam din experimentele anterioare, senzorul LPG înscris în fibre cu miez din silică pură și înveliș dopat cu -F este rezistent la radiație înregistrând modificări mici ale lungimii de undă Bragg datorate fluorului cu care fibra a fost dopată. În cazul LPG-urilor acoperite cu Al_2O_3 și PS se poate observa o ușoară tendință de migrare a lungimii de undă către

albastru echivalenta a 0.58 și respectiv -2.51 nanometrii. Ceilalți doi senzori acoperiți cu Ta_2O_5 și TiO_2 prezintă modificări ale lungimilor de undă care duc spre stânga de 0,51 nm și 1.92 nm.

Acest studiu și-a propus să urmărească efectele radiației ionizante asupra senzorilor de tip LPG având diferite acoperiri. Concluzia generală a acestui studiu este legată de faptul că în funcție de acoperirile folosite pentru senzori, aceștia au reacționat diferit în urma expunerii prelungite la radiație.

4.2.7 Impactul unui fascicol de electroni accelerați asupra senzorilor de tip LPG construiți în diferite fibre

Cea mai recenta lucrare publicată având ca subiect expunerea senzorilor pe fibra optică în câmp de radiații are ca titlu „Electron Radiation Impact on Long Period Gratings în Different Optical Fibers". Autorii au propus expunerea unor senzori de tip LPG în câmp de electroni pentru studierea efectelor induse. Au fost raportate pentru prima dată în literatura de specialitate rezultatele interacțiunii între senzori de tip LPG și radiația emisă de un fascicol de electroni. Pentru demararea experimentelor au fost produși 4 senzori LPG în fibre diferite. În tabelul 5 pot fi identificate fibrele în care au fost înscriși senzorii, conținutul miezului (dopanții prezenți), conținutul cămășii, notarea făcută pentru fiecare senzor, dar și perioada structurilor create.

Tabelul 5. Caracteristicile celor 4 senzori de tip LPG[36].

Fiber model	Core composition	Cladding composition	LPG id	LPG period Λ
Corning SMF28	Ge-doped	Pure-silica	SMF	395 μm
Fibercore PS1250/1500	B/Ge co-doped	Pure-silica	BGe	300 μm
Nufern S1310	Pure-silica	F-doped	Pure-silica	440 μm
FORC P-SM-5	P-doped	P-doped	P-doped	395 μm

În cadrul acestui experiment a fost folosit un accelerator liniar EEV M5125 tunabil cu o putere de 2 MW, cu bandă cuprinsă între 2992-3001 MHz. Debitul de doză a fost de 6 kGy/min, doza totală acumulată fiind de 192 kGy.

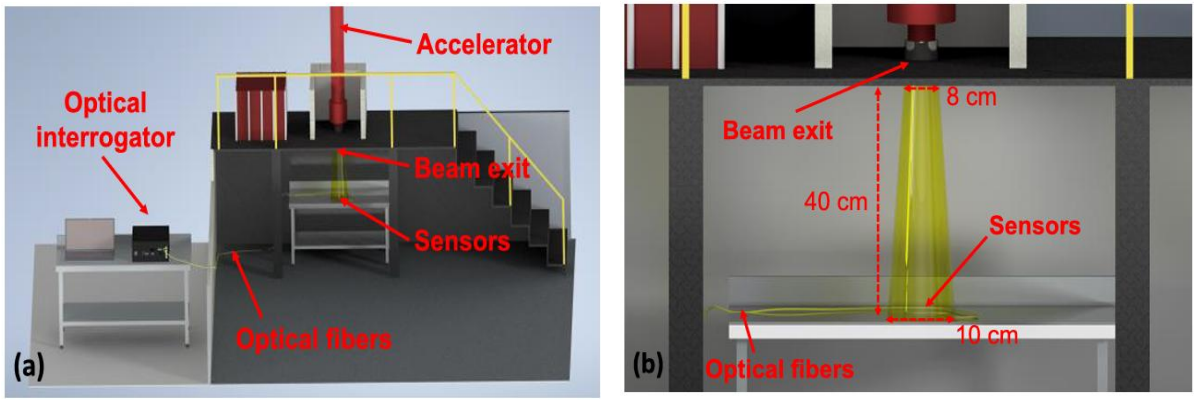


Fig. 13. Prezentarea schematică a montajului experimental a) prezentare de ansamblu b) prezentare detaliată a zonei de interacțiune [36].

Zona experimentală este împărțită în două, având partea de interacțiune acolo unde senzorii au fost plasați în fascicolul de electroni la o distanță de 40 cm față de flanșa exterioară a acceleratorului și partea de control unde se regăsesc atât echipamentele de monitorizare ale

acceleratorului, cât și echipamentele de interogare a senzorilor, într-o zonă separată și ecranată de zona experimentală.

Experimentul a fost împărțit în 3 faze. Primele două au constat în expunerea senzorilor la două doze similare a câte 6 kGy. Acești primi doi pași au fost făcuți pentru a testa reproductibilitatea experimentului și pentru a testa sensibilitatea fiecărui senzor în parte. A treia faza a experimentului a constat în expunerea prelungită a senzorilor la o doza totală acumulată de 180 kGy. Această fază și-a propus testarea limitelor la care senzorii pot funcționa. În total senzorii au avut un timp de expunere de 52 min acumulând o doză totală de 192 kGy.

După cum a se poate observa în imaginea următoare, cel mai sensibil senzor la radiația cu electroni este cel înscris în fibra dopată cu B-Ge, iar cel mai rezistent senzor la acest tip de radiație este cel înscris în fibra de siliciu cu puritate ridicată.

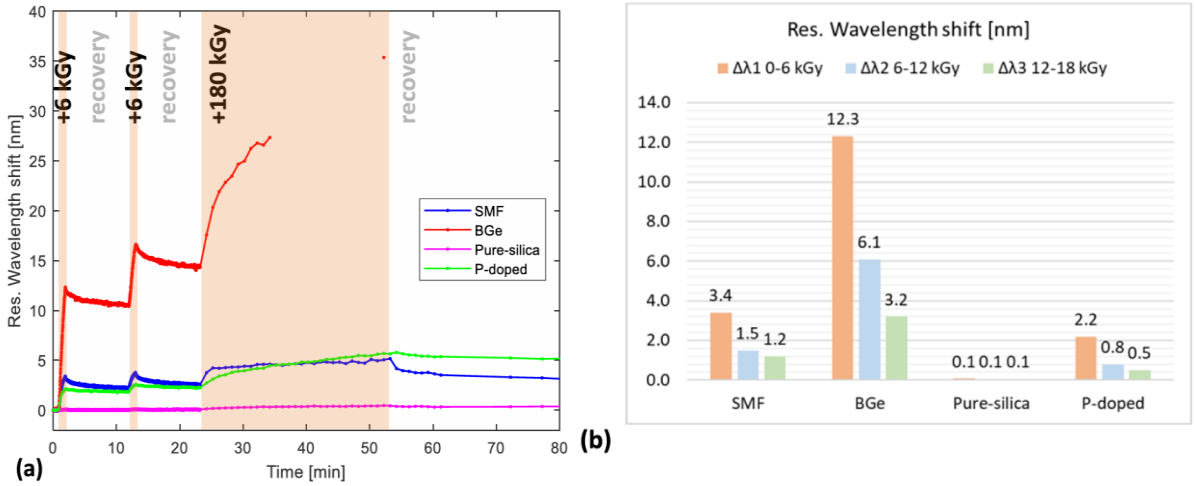


Fig. 14. a) Modificarea lungimii centrale de undă a fiecărui senzor în timpul iradierii, b) Modificarea lungimii de undă a senzorilor LPG pentru fiecare fază a iradierii pornind de la doza acumulată anterior [36].

În imaginea 14 a pot fi observate cele 3 faze de iradiere (cu portocaliu), dar și fazele de revenire a senzorilor pe o perioadă de 80 de minute de monitorizare. După cum se vede în imagine, toți senzorii prezintă o migrare a lungimii de undă spre dreapta și prezintă o ușoară revenire către lungimea de undă inițială în pauzele de iradiere. O altă observație care poate fi făcută este faptul că senzorii tind să se stabilizeze după o perioadă de expunere continuă de 30 de minute.

Tabelul 6. Modificarea lungimii centrale de undă a fiecărui senzor în toate cele 3 etape de iradiere în picometri [36].

LPG id	S_1 0-6 kGy [pm/kGy]	S_2 6-12 kGy [pm/kGy]	S_3 12-18 kGy [pm/kGy]
SMF	570	257	198
BGe	2057	1015	533
P-doped	358	128	77

În urma procesării datelor, a fost observată o scădere a sensibilității senzorilor cu fiecare etapă în parte. De la etapa 1 (0-6 kGy) la etapa 3 (12-18 kGy) sensibilitatea acestora a scăzut de la 65% până la 80% în funcție de fibra în care aceștia au fost înscriși. Un alt aspect sesizat este faptul că senzorul fabricat în fibra dopată cu BGe poate detecta o doză minimă de 0,5 Gy, pe când senzorul înscris în SMF și cel înscris în fibra dopată cu P pot detecta radiația începând cu 2 și 3 Gy.

Efectele pe termen lung ale radiației asupra fibrei sunt un subiect de interes care a fost de asemenea abordat în această lucrare. Senzorii au fost analizați la diferite intervale de timp la 21h, 8 zile, 6 luni și 12 luni după iradiere. După analizarea spectrelor a fost observat faptul că recuperarea senzorilor a început imediat ce aceștia au fost extrași din zona de iradiere. Recuperarea a fost una progresivă și s-a stabilizat la atingerea a 6 luni de la expunerea senzorilor la radiație.

Pentru a înțelege și mai bine efectele de recuperare ale fibrei, lungimea centrală de undă Bragg a senzorilor a fost și ea monitorizată.

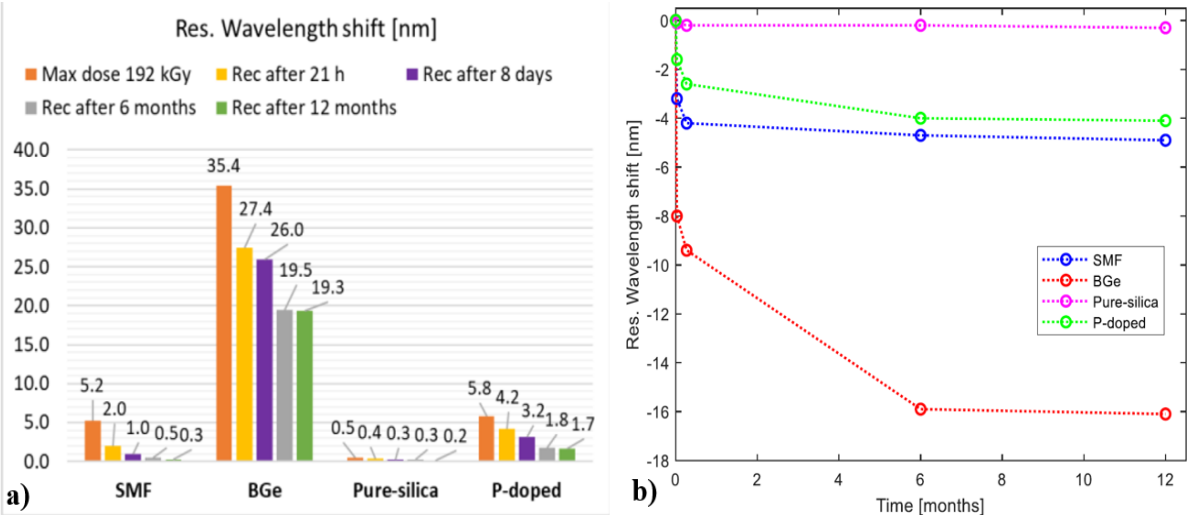


Fig. 15. Monitorizarea lungimii de undă Bragg a senzorilor și modificarea acesteia. a) monitorizarea modificării lungimii de undă a senzorilor înainte de iradiere, după acumularea a 192 kGy și după iradiere la diferite intervale de timp (21h, 8zile, 6 luni, 12 luni) b) modificarea lungimii de undă după extragerea senzorilor din zona de iradiere pe o durata de 12 luni [36].

În urma acestor verificări periodice ale fibrelor se observă faptul că nici un senzor LPG nu a revenit total la valorile inițiale dinaintea iradierii. Cea mai mare recuperare se observă la senzorii înscriși în fibra SMF și în fibra Nufern din siliciu pur care sunt la numai 0.3, respectiv 0.2 nanometrii de valoarea inițială dinaintea iradierii. În cazul senzorilor înscriși în fibrele dopate cu BGe și P, aceștia își mențin o modificare semnificativă a lungimii de undă Bragg chiar și la 12 luni de la iradiere. Chiar dacă se observă o tendință de recuperare, după primele 6 luni aceasta scade considerabil, iar modificările structurale ale fibrei sunt permanente atingând o recuperare de doar 45% din valoarea inițială.

În concluzie, această lucrare raporteaza pentru prima dată efectele radiației cu electroni accelerați asupra senzorilor de tip LPG. Au fost studiați senzori înscriși în 4 fibre având compoziții diferite. De asemenea, a fost studiată recuperarea fibrelor după extragerea acestora din zona de iradiere pentru o perioadă de 1 an. Fibrele au fost expuse la aproape 200 kGy doza totală acumulată, iar răspunsul senzorilor a fost diferit în funcție de fibra în care au fost înscriși.

CAPITOLUL 5. CONCLUZII

5.1 CONCLUZII GENERALE

Stadiul incipient al senzorilor optici, a fibrelor optice și a senzorilor pe fibră optică:

Aceasta lucrare si-a propus să prezinte utilitatea senzorilor pe fibră optică folosiți în multiple domenii cu accent pe senzorii folosiți în câmpuri de radiație ionizantă. După cum s-a relatat anterior în capitolul 1, senzorii optici au început să prindă contur acum mai bine de 2 secole. În perioada incipientă a senzorilor optici, aceștia au fost folosiți pentru transmiterea de mesaje pe distanțe mari cu ajutorul luminii. În 1854 a fost făcut primul experiment care a demonstrat faptul că lumina poate fi ghidată cu ajutorul unui jet de apă. Fenomenul de ghidare a luminii s-a bucurat de atenția multor cercetători în decursul anilor următori, acest lucru a împins la crearea fibrelor optice la jumătatea secolului 20. Acești pași incipienți în acest domeniu au fost baza sistemului de transmitere a informațiilor din zilele noastre care se bazează în proporție de 90% pe informații prin fibre optice.

Prima utilizare a fibrelor optice ca senzori a avut loc în 1970 folosind două mănunchiuri de fibre, unul emițător, iar celălalt receptor. Aceste două fibre au fost folosite pentru a măsura distanța dintre un obiect care reflecta un fascicol de lumină provenit de la una din ele, fiind captat de cealaltă. Ținând cont de avansul tehnologic fulgerător în acest domeniu, treptat, senzorii pe fibră optică au început sa fie folosiți și pentru detectarea diferitor mărimi fizice precum: temperatură, umiditate, distanță, deplasare, presiune, etc.

Motivele principale pentru care senzorii pe fibră optică prezintă un interes major pentru a fi utilizați în diferite industrii sunt: reducerea costurilor de producție prin maturizarea tehnologiilor cu ajutorul cărora aceștia sunt produși, creșterea sensibilității și acurateței acestora pentru aplicațiile în care sunt deja folosiți, crearea de noi senzori prin diferite tehnologii pentru aplicații de noutate în diferite domenii, dimensiunile reduse ale acestora, capacitatea de funcționalizare a acestora, distanțele mari pe care aceștia le pot acoperii, distanțele mari de la care aceștia pot fi monitorizați, rezistența acestora în diferite medii neprietenoase.

Senzorii pe fibră optică folosiți în câmpuri de radiație ionizanta

În această lucrare atenția a fost îndreptata spre interacția senzorilor pe fibră optică cu diferite câmpuri de radiație ionizantă. Parametrii de fabricare aleși pentru fabricarea fibrelor și a senzorilor pe fibră optică influențează în mod direct modul în care acestea răspund la câmpuri de radiație ionizantă. De asemenea, este foarte importantă alegerea materialelor cu care fibra optică este dopată pentru a obține răspunsul dorit de la senzorii folosiți în diferite experimente. Având în vedere faptul că cei mai mulți senzori pe fibră optică folosesc rețele de tip Bragg, cele mai multe experimente utilizează senzori de tip FBG și LPG. Pentru o bună clasificare, efectele radiațiilor ionizante asupra senzorilor pe fibră optică au fost tratate separat în funcție de tipul de radiație ionizantă.

5.2 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PROPRII

În cazul tuturor tipurilor de radiație a fost observat faptul că fibrele suferă o îmbătrânire accelerată direct proporțională cu doza totală acumulată de acestea în timpul experimentelor. În funcție de materialele din care fibra este fabricată aceasta îmbătrânirea influențează în mod diferit experimentul și răspunsul fibrelor la radiație. În cazul senzorilor înscriși în fibra cu miez din silică pură, efectul radiației asupra senzorilor este cu câteva ordine de mărime mai mic față de efectul altor fenomene fizice precum: temperatura, umiditatea sau presiunea. În acest caz, senzorii de acest tip sunt folosiți pentru a monitoriza diferiți parametri independenți de cei ai radiației, care sunt extrem de importanți în cadrul acestor infrastructuri de iradiere. În cazul senzorilor înscriși în fibre optice dopate se poate observa faptul că aceștia au o sensibilitatea sporită la diferite tipuri de radiație. Răspunsul senzorilor poate varia în funcție de fiecare dopant în parte, dar și de concentrația în care acesta se regăsește în fibră. Lungimea de undă Bragg se poate modifica cu zeci de nanometri în cazul senzorilor ultrasensibili la radiație ceea ce face posibilă folosirea acestora pe post de detectori ai radiației. Avantajul major pentru care acest tip de senzori ar putea fi folosiți în viitor pentru monitorizarea și diagnosticarea câmpurilor de radiație este dat de faptul că răspunsul spectral al senzorilor poate fi înregistrat și interpretat în timp real, oferind informații importante despre parametrii ambientali sau ai câmpului de radiație pe parcursul stagiilor de iradiere.

În cadrul Tezei de Doctorat curente, am raportat experimente realizate pe parcursul desfășurării școlii Doctorale, cu senzori pe fibră optică de tip FBG/LPG expuși la radiații ionizante gamma și electroni în 10 lucrări științifice. Subiectele de cercetare au fost originale, și publicate ulterior în cadrul Jurnalelor științifice cu factori scientometrici ridicați (cuartila Q1), stând la baza parcursului științific personal, în viitor, în activitatea de cercetare experimentala în domeniul opticii, fotonicii și radiațiilor ionizante.

Contribuțiile personale la aceste lucrări științifice pot fi reprezentate succint prin:

Implementarea procedurilor pentru experimentele de iradiere cu radiație ionizantă a dispozitivelor fotonice bazate pe fibre optice.

Proiectarea de tip CAD a montajelor experimentale pentru a fi utilizate în cadrul raportărilor științifice de profil.

Fabricarea de componente opto-mecanice necesare în cadrul montajelor experimentale personalizate în funcție de aplicație.

Implementarea montajelor experimentale în laborator și în infrastructurile adiacente.

Achiziționarea datelor și prelucrarea acestora pe parcursul etapelor experimentale.

Studii teoretice ce implică efectele radiației ionizante asupra fibrelor optice, materialelor dopante, structurilor de tip rețele Bragg și corelarea acestor efecte cu modele de fabricare ale senzorilor pe fibră optică pentru optimizarea dispozitivelor în aplicații de securitate în medii dure.

5.3 DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE

Importanța fibrelor optice și a senzorilor pe fibră optică este clară pentru avansul tehnologic în diferite domenii cheie pe plan mondial. Rețelele tot mai răspândite de comunicații și senzorii pe fibră optică care se regăsesc în din ce în ce mai multe aplicații amplifica necesitatea cercetării în acest domeniu.

Împreună cu echipa din cadrul laboratorului, mă voi concentra asupra activităților precum:

Dezvoltarea de senzori pe fibră optică cu sensibilități ridicate, pentru aplicații medicale precum: detecția localizată a dozei de radiație în cadrul procedurilor de radioterapie.

Dezvoltarea de noi montaje experimentale care să îmbunătățească calitatea datelor obținute și care să elimine limitările curente prin manipularea cât mai redusă a dispozitivelor prin automatizări, creșterea numărului de senzori monitorizați în paralel și prelucrarea în timp real a răspunsului spectral în corelare cu radiația ionizantă.

Studii teoretice privind abordarea câmpurilor mixte de radiație ionizante provenite prin interacția laseri-materie și implementarea platformelor de fibre optice în astfel de câmpuri.

Utilizarea fibrelor optice în aplicații bio-medicale și de bio-sensing.

Studii teoretice și dezvoltarea experimentală a metodelor complementare de detecție a radiațiilor ionizante, prin intermediul fibrelor optice multimodale, a fenomenelor de scintilație și a detectoarelor fotonice de particule pentru soluții complexe de monitorizare.

CAPITOLUL 6. REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

[1] J. Tyndall, *Notes of a course of nine lectures on light delivered at the Royal institution of Great Britain April 8-June 3, 1869* . 1820.

[2] A. G. Bell, "On the production and reproduction of sound by light," *Am J Sci*, vol. s3-20, no. 118, pp. 305–324, Oct. 1880, doi: 10.2475/AJS.S3-20.118.305.

[3] Casimer. DeCusatis, "Fiber optic data communication : technological trends and advances," p. 568, 2002, Accessed: Jun. 29, 2023. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Fiber_Optic_Data_Communication.html?hl=ro&id=yDjUlE8VTLsC

[4] C. P. Sandbank, "FIBRE OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS.," pp. 3–12, 1977, doi: 10.1109/EUMA.1977.332387.

[5] G. Rademacher *et al.*, "Randomly Coupled 19-Core Multi-Core Fiber with Standard Cladding Diameter," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2023 (2023), paper Th4A.4*, p. Th4A.4, Mar. 2023, doi: 10.1364/OFC.2023.TH4A.4.

[6] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl Phys Lett*, vol. 32, no. 10, pp. 647–649, May 1978, doi: 10.1063/1.89881.

[7] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1263–1276, Aug. 1997, doi: 10.1109/50.618320.

[8] S. K. Hoeffgen *et al.*, "Comparison of the radiation sensitivity of fiber bragg gratings made by four different manufacturers," *IEEE Trans Nucl Sci*, vol. 58, no. 3 PART 2, pp. 906–909, Jun. 2011, doi: 10.1109/TNS.2011.2106800.

[9] P. Cetier, S. Rougeault, M. Monerie, E. Fertein, and F. Lahoreau, "Behavior of Bragg Gratings, Written in Germanosilicate Fibers, Against ϒ-Ray Exposure at Low Dose Rat," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, no. 11, pp. 1350–1352, 1994, doi: 10.1109/68.334836.

[10] P. Ferdinand *et al.*, "Optical fibre Bragg grating sensors for structure monitoring within the nuclear power plants," *https://doi.org/10.1117/12.198636*, vol. 2425, pp. 11–20, Dec. 1994, doi: 10.1117/12.198636.

[11] A. Gusarov, S. Vasiliev, O. Medvedkov, I. Mckenzie, and F. Berghmans, "Stabilization of fiber bragg gratings against gamma radiation," *Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS*, 2007, doi: 10.1109/RADECS.2007.5205516.

[12] A. Piccolo, S. Delepine-Lesoille, M. Landolt, S. Girard, Y. Ouerdane, and C. Sabatier, "Coupled temperature and γ-radiation effect on silica-based optical fiber strain sensors based on Rayleigh and Brillouin scatterings," *Opt Express*, vol. 27, no. 15, p. 21608, Jul. 2019, doi: 10.1364/OE.27.021608.

[13] F. Esposito *et al.*, "Real-time analysis of arc-induced Long Period Gratings under gamma irradiation," *Sci Rep*, vol. 7, Mar. 2017, doi: 10.1038/SREP43389.

[14] A. I. Gusarov *et al.*, "High total dose radiation effects on temperature sensing fiber Bragg gratings," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, no. 9, pp. 1159–1161, Sep. 1999, doi: 10.1109/68.784237.

[15] A. Morana *et al.*, "Radiation-Hardened Fiber Bragg Grating Based Sensors for Harsh Environments," *IEEE Trans Nucl Sci*, vol. 64, no. 1, pp. 68–73, Jan. 2017, doi: 10.1109/TNS.2016.2621165.

[16] H. Henschel, S. K. Hoeffgen, K. Krebber, J. Kuhnhenn, and U. Weinand, "Influence of fiber composition and grating fabrication on the radiation sensitivity of fiber bragg gratings," *Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS*, 2007, doi: 10.1109/RADECS.2007.5205461.

[17] J. Kuhnhenn *et al.*, "Gamma Radiation Tests of Radiation-Hardened Fiber Bragg Grating-Based Sensors for Radiation Environments," *IEEE Trans Nucl Sci*, vol. 64, no. 8, pp. 2307–2311, Aug. 2017, doi: 10.1109/TNS.2017.2673023.

[18] A. Pal *et al.*, "Sensors for Harsh Environment: Radiation Resistant FBG Sensor System," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 16, pp. 3393–3398, Aug. 2017, doi: 10.1109/JLT.2016.2598666.

[19] D. G. Sporea, A. Stəncalie, C. D. Neguţ, G. Pilorget, S. Delepine-Lesoille, and L. Lablonde, "Comparative study of long period and fiber Bragg gratings under gamma irradiation," *Sens Actuators A Phys*, vol. 233, pp. 295–301, Aug. 2015, doi: 10.1016/J.SNA.2015.07.007.

[20] K. Kalli *et al.*, "L-band CYTOP Bragg gratings for ultrasound sensing," p. 8, May 2018, doi: 10.1117/12.2307129.

[21] S. Ju, Y. Kim, K. Linganna, Y. H. Kim, and W. T. Han, "Effect of Temperature and Gamma-Ray Irradiation on Optical Characteristics of Fiber Bragg Grating Inscribed Radiation-Resistant Optical Fiber," *Photonic Sensors*, vol. 10, no. 1, pp. 16–33, Mar. 2020, doi: 10.1007/S13320-019-0567-4/METRICS.

[22] D. Sporea, A. Stăncălie, N. Becherescu, M. Becker, and M. Rothhardt, "An electron beam profile instrument based on FBGs," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 9, pp. 15786–15801, Aug. 2014, doi: 10.3390/S140915786.

[23] T. Blanchet *et al.*, "X-Ray, proton, and electron radiation effects on type i fiber bragg gratings," *IEEE Trans Nucl Sci*, vol. 65, no. 8, pp. 1632–1638, Aug. 2018, doi: 10.1109/TNS.2018.2823771.

[24] E. W. Taylor, K. E. Hulick, J. M. Battiato, A. D. Sanchez, J. E. Winter, and A. R. Pirich, "Response of germanium-doped fiber Bragg gratings in radiation environments," *https://doi.org/10.1117/12.354676*, vol. 3714, pp. 106–113, Jul. 1999, doi: 10.1117/12.354676.

[25] E. Currás *et al.*, "Influence of the fiber coating on the proton radiation sensitivity of fiber bragg gratings," *Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS*, pp. 345–348, 2011, doi: 10.1109/RADECS.2011.6131410.

[26] M. FRÃ–VEL *et al.*, "Proton Radiation Sensitivity of Fiber Bragg Gratings for Particle Colliders," *Structural Health Monitoring 2013*, vol. 0, no. 0, 2013, Accessed: Sep. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.dpi-proceedings.com/index.php/shm2013/article/view/22811

[27] M. Bakaic *et al.*, "Fiber-optic Bragg gratings for temperature and pressure measurements in isotope production targets for nuclear medicine," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 13, Jul. 2020, doi: 10.3390/APP10134610.

[28] L. Remy, G. Cheymol, A. Gusarov, A. Morana, E. Marin, and S. Girard, "Compaction in optical fibres and fibre Bragg gratings under nuclear reactor high neutron and gamma fluence," *2015 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications, ANIMMA 2015*, 2015, doi: 10.1109/ANIMMA.2015.7465627.

[29] R. S. Fielder, "High Neutron Fluence Survivability Testing of Advanced Fiber Bragg Grating Sensors," pp. 650–657, Feb. 2004, doi: 10.1063/1.1649627.

[30] A. Stancalie *et al.*, "A New Setup for Real-Time Investigations of Optical Fiber Sensors Subjected to Gamma-Rays: Case Study on Long Period Gratings," *Sensors 2020, Vol. 20, Page 4129*, vol. 20, no. 15, p. 4129, Jul. 2020, doi: 10.3390/S20154129.

[31] A. Theodosiou *et al.*, "Comparative Study of γ- and e-Radiation-Induced Effects on FBGs Using Different Femtosecond Laser Inscription Methods," *Sensors 2021, Vol. 21, Page 8379*, vol. 21, no. 24, p. 8379, Dec. 2021, doi: 10.3390/S21248379.

[32] F. Esposito *et al.*, "The Impact of Gamma Irradiation on Optical Fibers Identified Using Long Period Gratings," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 41, no. 13, pp. 4389–4396, Jul. 2023, doi: 10.1109/JLT.2022.3191163.

[33] A. Leal-Junior *et al.*, “Influence of gamma and electron radiation on perfluorinated optical fiber material composition,” *Mater Lett*, vol. 340, p. 134205, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.MATLET.2023.134205.

[34] R. Mihalcea, D. Ighigeanu, D. Negut, and A. Stancalie, “COMPARATIVE EVALUATION OF ELECTRON AND GAMMA INDUCED EFFECTS ON FBG FABRICATED IN STANDARD AND RADIATION HARDENED OPTICAL FIBERS BY DIFFERENT TECHNIQUES,” *U.P.B. Sci. Bull., Series A*, vol. 85, no. 3, p. 2023.

[35] F. Esposito *et al.*, “Optical properties of thin films monitored in real-time at high gamma radiation doses using long period fiber gratings,” *Opt Laser Technol*, vol. 176, p. 111019, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.OPTLASTEC.2024.111019.

[36] A. Stancalie *et al.*, “Electron radiation impact on Long Period Gratings in different optical fibers,” *IEEE Sens J*, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3508885.